



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



GRAU EN ENGINYERIA DE TECNOLOGIES INDUSTRIALS

TREBALL FINAL DE GRAU:

**SISTEMA ELÈCTRIC-ELECTRÒNIC D'UNA MOTOCICLETA
AMB MOTOR ELÈCTRIC**

Disseny conceptual

Autor: Joaquim Guilera

Tutor: Emilio Angulo



RESUM DE LA MEMÒRIA

El projecte aquí realitzat consisteix en dissenyar conceptualment el sistema elèctric-electrònic d'una motocicleta amb motor elèctric.

Per fer-ho, es realitzarà per començar un breu recorregut per la història de la motocicleta, entenent quan va sorgir la idea i com es va plasmar en els primers models, com va anar evolucionant i quin paper va tenir a successos tant importants com les dues guerres mundials, fins arribar al dia d'avui on existeixen nombrosos segments (supersport, sport touring, adventure, naked, custom, enduro, motocross, trial, scooter...) i on s'ha convertit en un dels principals mètodes de transport a molts països d'arreu.

Posteriorment, s'analitzarà l'evolució recent del mercat així com la conscienciació general pel medi ambient per tal de localitzar oportunitats de negoci a territoris concrets i en segments específics de la indústria de la motocicleta.

Un cop escollit el tipus de producte i cap a qui anirà dirigit, es començarà el gruix del projecte d'enginyeria:

Primerament, es definiran les especificacions desitjades del producte, tot fixant uns límits que en cap cas es podran creuar. Per fer-ho, es tindran en compte les especificacions dels possibles competidors, els quals s'identificaran i analitzaran breument per tal d'entendre cap on han d'anar els tirs de la motocicleta a dissenyar.

Seguidament, es procedirà a iniciar el disseny del sistema elèctric. Es distingiran tots els components principals, s'estudiarà la teoria que regeix el seu funcionament i es realitzarà la tria d'un model específic per a cada un d'ells. Un cop això estigui fet, s'elaborarà l'esquema de conjunt o, en altres paraules, l'acoblament conceptual i esquemàtic de tots aquests components.

Posteriorment, es realitzarà una simulació dinàmica per a determinar i ajustar el comportament de la motocicleta. S'haurà de dissenyar el model i utilitzar-lo en diferents simulacions que reproduiran diverses situacions quotidianes en les que un usuari qualsevol de la motocicleta podria trobar-s'hi. Aquestes simulacions serviran per ajustar certs paràmetres del sistema d'acord amb les especificacions objectiu definides al principi.

Un cop sabudes i plasmades les especificacions finals del producte, es passarà a fer els estudis normatiu, econòmic, ambiental i a redactar les conclusions del projecte.





TAULA DE CONTINGUTS

1.	Objectiu, abast i justificació del projecte.....	5
1.1.	Objectiu del projecte	5
1.2.	Abast del projecte.....	5
1.3.	Justificació.....	6
2.	Introducció.....	7
2.1.	Història.....	8
2.2.	Estat actual del mercat	11
2.2.1.	Mercat Europeu.....	11
2.2.2.	Mercat Espanyol	13
3.	Disseny conceptual general	16
3.1.	Tipus de motocicleta.....	16
3.2.	Especificacions i requisits del disseny.....	16
4.	Disseny del sistema elèctric	20
4.1.	Esquema de conjunt	20
4.2.	Identificació de components	20
4.3.	Components bàsics	21
4.3.1.	Motor.....	21
4.3.2.	Bateries.....	27
4.3.3.	Controlador.....	31
4.3.4.	Controls.....	36
4.3.5.	Fre regeneratiu	36
4.4.	Components d'alimentació.....	39
4.4.1.	BMS.....	39
4.4.2.	Carregador	41
4.4.3.	Cablejat.....	44
4.4.4.	Contactor general	45
4.5.	Components auxiliars	46
4.5.1.	Convertidor.....	47
4.6.	Simulació dinàmica	49
4.6.1.	Model de simulació.....	50



4.6.2. Proves dinàmiques	58
4.7. Especificacions obtingudes	69
5. Normativa	70
5.1. Normativa referent a l'homologació de vehicles elèctrics	70
5.2. Normativa referent a les subvencions per a l'adquisició de vehicles elèctrics.....	71
6. Estudi econòmic.....	72
7. Impacte ambiental.....	73
8. Planificació	75
9. Consideracions i conclusions	76
10. Bibliografia i webgrafia	77



1. Objectiu, abast i justificació del projecte

1.1. Objectiu del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és el disseny del sistema elèctric-electrònic d'una motocicleta elèctrica amb prestacions equivalents a una motocicleta de combustió d'uns 125-150 cc, basat en la identificació i selecció dels components que han de formar el sistema, així com l'esquema conceptual del seu acoblament (esquema de conjunt).

1.2. Abast del projecte

Així doncs, per a la realització del projecte caldrà:

- Aprenentatge:

Estudiar el context general en el que el sector de vehicles elèctrics es troba. Determinar els avantatges que hi ha respecte els vehicles amb motors de combustió interna, així com els actuals inconvenients.

Identificar els components del sistema elèctric-electrònic d'una motocicleta de les característiques indicades i estudiar la teoria que regeix el seu comportament, així com entendre el seu funcionament.

- Cerca:

Realitzar un benchmark de la oferta actual de motocicletes elèctriques del mercat, identificant els fabricants i productes que actualment tenen una sortida destacable per a tenir unes pautes sòlides a l'hora de dissenyar el sistema elèctric de la motocicleta.

Realitzar una cerca de fabricants dels components que formaran part del sistema, localitzant diferents models de cada component que puguin exercir la funció requerida al sistema elèctric.

- Realització:

Escollir un model definitiu per a cada component que formarà part del sistema elèctric i posteriorment procedir a fer la integració dels components (esquema de conjunt).

Realitzar una simulació dinàmica amb el programari Microsoft Excel (Paquet Office) per a comprovar el comportament de la motocicleta en diferents situacions i intentar assolir les prestacions definides a l'inici del projecte. Ajustar les variables modificables (assumint com variables no modificables les fixades pels components escollits) per tal d'assolir aquest objectiu.

Treballar paral·lelament amb Borja Soler comunicant les dimensions, pesos i resta de característiques de cada component del sistema elèctric necessàries per al correcte disseny i dimensionament del sistema mecànic.

Identificar el marc normatiu que afecta al projecte i quantificar l'impacte ambiental que aquest pot ocasionar.

Realitzar un estudi econòmic i calcular un cost per al projecte realitzat (disseny conceptual) així com el cost que tindria un primer prototip del sistema elèctric.



Aquest projecte, com indica el títol, és un disseny conceptual del sistema elèctric-electrònic d'una motocicleta BEVⁱ. No es dissenyaran els components, sinó que es triaran d'entre els que estiguin disponibles al mercat. Tampoc es realitzarà un prototip físic del sistema, sinó que es simularà el seu acoblament realitzant l'esquema de conjunt dels components.

1.3. Justificació

En Borja Soler i jo mateix, Joaquim Guilera, som dos enginyers industrials que treballem conjuntament en una consultoria d'enginyeria.

Una empresa fabricant i comercialitzadora de motocicletes de combustió, ens contacta per transmetre'ns les seves inquietuds envers el sector dels vehicles elèctrics. Els seus propietaris s'han donat compte que els vehicles elèctrics tenen cada vegada més acollida entre els usuaris de vehicles de transport privat, i també del cada cop més gran nombre d'empreses que en conseqüència es dirigeix a aquest perfil de client.

Es plantegen si seria un bon moment per donar el salt a un sector que fins fa pocs anys encara molts consideraven que formava part d'un futur llunyà, però que ara ja ensenya les dents a la indústria d'automoció tradicional. En aquesta línia i donada la inexperiència de l'empresa en aquest sector, l'administració ens demana a en Borja i a mi que realitzem un estudi i un prototip de motocicleta elèctrica que pugui interessar a les persones susceptibles d'invertir en aquest tipus de productes dins del seu perfil de client.

En Borja i jo decidim acceptar l'encàrrec, dividint-nos la feina de manera que ell s'ocuparà del sistema mecànic i jo del sistema elèctric-electrònic del prototip.

ⁱ BEV: Acrònim anglès per a Battery Electric Vehicle

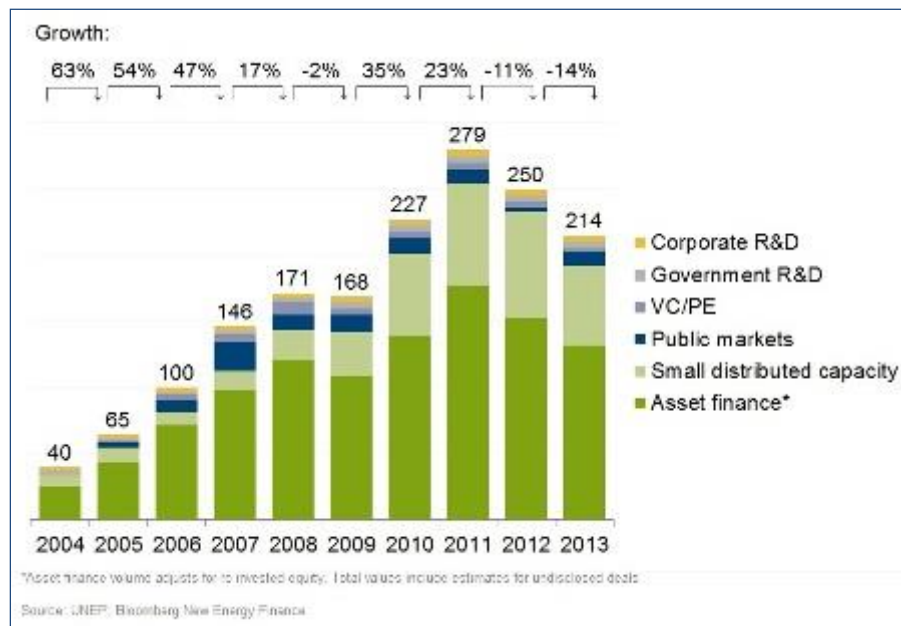


2. Introducció

Una motocicleta és un vehicle de transport de dues rodes amb un motor que impulsa la roda posterior. La roda directriu és la davantera. Sobre el xassís que conforma la seva estructura i al qual es munten tots els components, s'hi poden transportar fins a un màxim de dues persones. Amb un disseny anomenat sidecar ("cotxe lateral" en anglès) acoblat al lateral de la motocicleta, podrien transportar-s'hi legalment fins a tres persones.

Tradicionalment, les motocicletes, al igual que la majoria de vehicles de transport moderns, s'impulsen amb un motor de combustió interna. El segle XXI, però, es caracteritza entre altres coses per la presa de consciència del fenomen conegut com *Canvi Climàtic*, moviment definit als anys 1970 que s'ha convertit en una de les majors preocupacions de la comunitat internacional. Aquest problema, altrament conegut com *Escalfament Global* i causa de l'incessant creixement de la població i indústria mundial, ha motivat nombroses campanyes de protesta i conscienciació i també reaccions per part dels diferents estats del món, que han proposat en diverses ocasions accions de mesura com el Protocol de Kioto, el qual limita les emissions de CO₂ dels països participants (Unió Europea i Argentina).

És en aquest context on, durant el que s'ha viscut de segle XXI les inversions en R+D+i basades en fonts d'energia més sostenibles o "renovables" com la eòlica o la solar es disparen arribant a màxims històrics.



Il·lustració 1: Evolució de la inversió en renovables. Dades en milers de milions de USD.

El sector del transport, en el paper d'un dels principals responsables de les emissions de CO₂ amb un 27% del totalⁱⁱ, no es queda enrere. Nombroses empreses han invertit en la cerca de nous sistemes de propulsió independents del petroli, com per exemple motors d'explosió amb combustibles com

ⁱⁱ Dades de 2013 segons l'Agència de Protecció Ambiental d'EUA (EPA)



l'ethanol o el biodièsel. Però els sistemes de propulsió que estan actualment al cap davant de tots els departaments de R+D+i en el sector de l'automoció i que en els darrers anys s'han fins hi tot implementat en les seves primeres versions i estan a disposició dels consumidors, són els basats en tecnologia elèctrica.

En aquest treball, s'exposa el disseny conceptual del sistema elèctric - electrònic d'una motocicleta propulsada amb motor elèctric.

2.1. Història

El primer vehicle de dues rodes alineades longitudinalment propulsat amb un motor, va ser fruit de l'enginy del nord-americà Sylvester Howard Roper, que al 1867 va inventar el que es podria considerar la primera motocicleta. Aquesta anava impulsada per un motor a vapor. És per aquest motiu que molts historiadors experts consideren la primera motocicleta la dissenyada al 1885 pels alemanys Wilhelm Maybach i Gottlieb Daimler, ja que aquesta fou la primera amb motor de combustió interna. Concretament, el motor que muntava seguia el cicle d'Otto, enginy del també alemany Nikolaus August Otto, creador del primer motor de combustió interna de quatre temps.

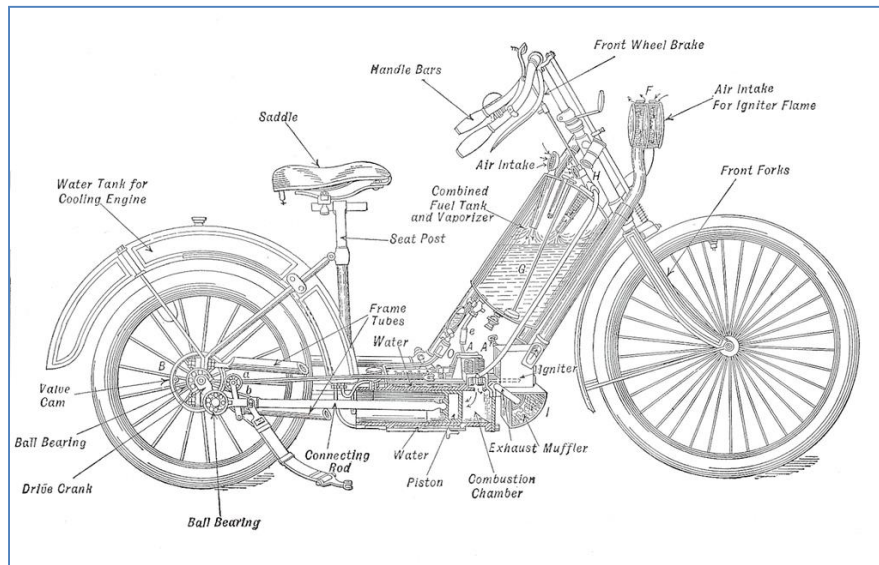


Il·lustració 2: Rèplica de la *Reitwagen*, la motocicleta de Maybach i Daimler.

Aquesta motocicleta tenia un motor de 264 cc que a 600 rpm entregava una potència de 0,5 CV, permetent-li assolir una velocitat punta de 11 km/h. És per aquest motiu que anava equipada amb dues rodes laterals que permetien al pilot mantenir-se en equilibri.

Però la primera motocicleta produïda en massa va ser la presentada al 1894 pels germans alemanys Heinrich i Wilhelm Hildebrand, enginyers de motors de vapor que en societat amb Alois Wolfmüller van dissenyar el primer vehicle de transport que seria anomenat amb el terme motocicleta *Motorrad* en alemany. La moto presentava un motor de 1.489cc i entregava 2,6 CV a 240 rpm. Pesava 50 Kg en sec i assolía una velocitat de 45 Km/h, la mateixa que el límit màxim al que poden circular actualment els ciclomotors (motocicletes amb motor de 50 cc).





Il·lustració 3: Diagrama de la motocicleta de 1894 Hildebrand & Wolfmüller.

La idea de motoritzar bicicletes amb motors de combustió interna ràpidament va arribar a països veïns d'Alemanya com França o Anglaterra, així com a Estats Units. D'aquesta manera, molts antics fabricants de bicicletes adaptaven els seus models per a poder incorporar-hi motors i, com més avançava la tecnologia d'aquests motors i més potència eren capaços d'atorgar, més gran era el nombre de productors de motocicletes. Així, als inicis del segle XX els principals fabricants de motocicletes, alguns dels quals encara avui tenen una forta presència, ja s'havien establert. Empreses angleses com *Triumph Motorcycles* (1898) i *Royal Enfield* (1899) o americanes com *Indian* (1901) i *Harley Davidson* (1903), en són la prova i marquen l'inici del que posteriorment esdevé una gran indústria amb moltes branques i aplicacions.

Com la història ha demostrat, la indústria en general (no només la armamentística) pateix impulsos particularment forts quan hi ha guerres globals on els països que hi lluiten ho fan en condicions de força similars. La Primera Guerra Mundial (WW1), sense oblidar el seu dramàtic caràcter de Guerra de Desgast, és un dels exemples més il·lustratius d'ús i en conseqüència avenç de tecnologia amb fins de avantposar-se a l'enemic en el transcurs de les batalles.

En el cas particular que ens aborda, la producció de motocicletes va augmentar amb molta força durant la WW1. Utilitzades per mantenir comunicacions efectives amb les tropes de primera línia van substituir els missatgers a cavall amb l'objectiu d'entregar missatges, realitzar reconeixement de personal i actuar com a policia militar. Cap al final de la guerra, l'empresa *Harley Davidson* destinava el 50% de la seva producció a fins militars, i del model anglès *Type H* de *Triumph* se'n van vendre més de 30.000ⁱⁱⁱ a les forces aliades.

ⁱⁱⁱ Dades i Il·lustració 4 (pàgina següent) cortesia de l'Imperial War Museum





Il·lustració 4: Un parell de soldats amb la *Triumph Type H*, durant la WW1.



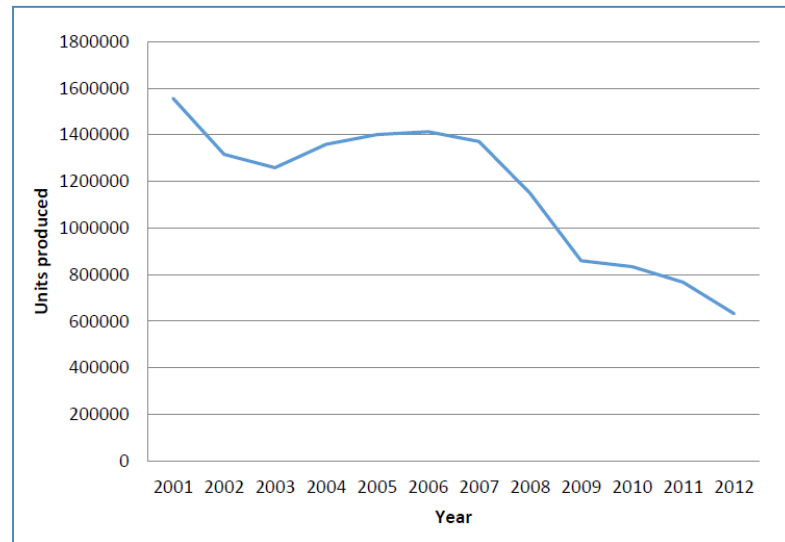
Il·lustració 5: BMW R75 amb Sidecar. 745 cc, 26 CV i 420 Kg, usada durant la WW2 per l'exèrcit Alemany.

Durant la postguerra i, posteriorment, la Segona Guerra Mundial (WW2), la indústria del motociclisme segueix creixent millorant factors com el pes, el rendiment, la versatilitat i la funcionalitat dels seus productes. Per exemple, és durant aquesta etapa que es desenvolupa l'accessori conegut com *Sidecar*. Aquest ja s'havia utilitzat durant la WW1 però va ser a la WW2 on l'exèrcit alemany va mostrar el seu avançat enginy que presentava fins hi tot tracció a la roda lateral a través d'un diferencial, i on s'hi podien acoblar armes de gran calibre permetent a un grup de soldats amb sidecar realitzar fins hi tot missions d'atac.

Cap al 1950 la indústria del motociclisme, plenament instaurada a la societat civil, s'obre al món de la competició i, és en tant sols un segle d'història que aquest invent ideat inicialment amb un motor a vapor i amb 2.000 unitats fabricades en la seva primera versió produïda en massa, es converteix en un dels principals mètodes de transport a països on el clima ho permet, amb produccions que ronden el milió d'unitats només a Europa^{iv}.

^{iv} Dada segons el 2013 *Statistical Overview* de la *European Association of Motorcycle Manufacturers* (<http://www.acem.eu>)





Il·lustració 6: Producció de motocicletes a Europa durant el s. XXI.

2.2. Estat actual del mercat

Havent fet una breu pinzellada de la història de la motocicleta, és moment d'analitzar quina és la situació actual del mercat, què és el que busquen els consumidors i el que ofereixen els productors, i així determinar quin és el producte òptim amb el que es podria entrar al sector per tal de maximitzar les possibilitats d'èxit del projecte i minimitzar-ne els riscos.

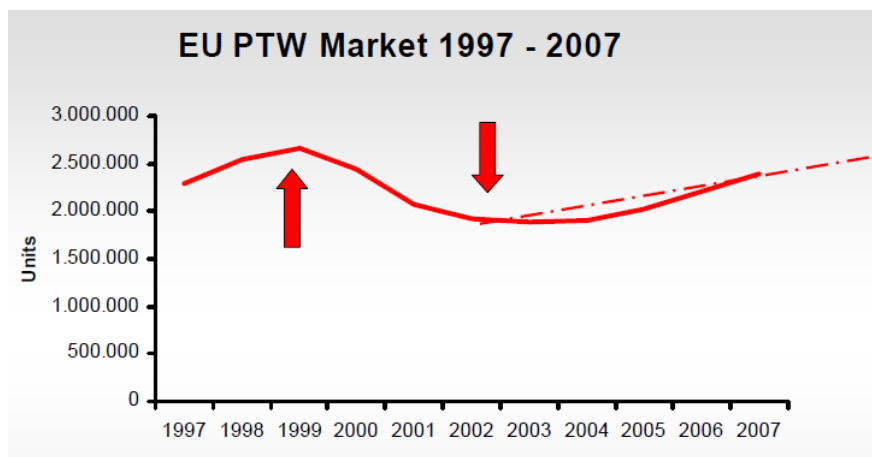
2.2.1. Mercat Europeu

Com mostra la il·lustració 6, la venda de motocicletes ha augmentat molt respecte els seus inicis però ha disminuït durant la Crisi Econòmica Global que començà a mostrar els seus devastadors efectes al 2008. Però per treure informació útil de la situació del mercat, no n'hi ha prou amb saber el nombre de motocicletes que es venen any rere any; cal indagar més profundament en aquesta xifra, discrepant per països i tipus de motocicleta i veient quines són les tendències dels usuaris a l'hora d'interactuar amb el sector.

Tenint en compte que la conscienciació sobre el mal que l'ésser humà ocasiona al medi ambient és força més agosarada a Europa que a EEUU^v (sigui per raons culturals o per factors com el preu del combustible), es centra l'anàlisi de mercat a Europa. Així doncs, l'Associació Europea de Fabricants de Motocicletes és l'entitat ideal per extreure aquesta informació ja que disposa de dades estadístiques molt significatives del sector del motociclisme al continent.

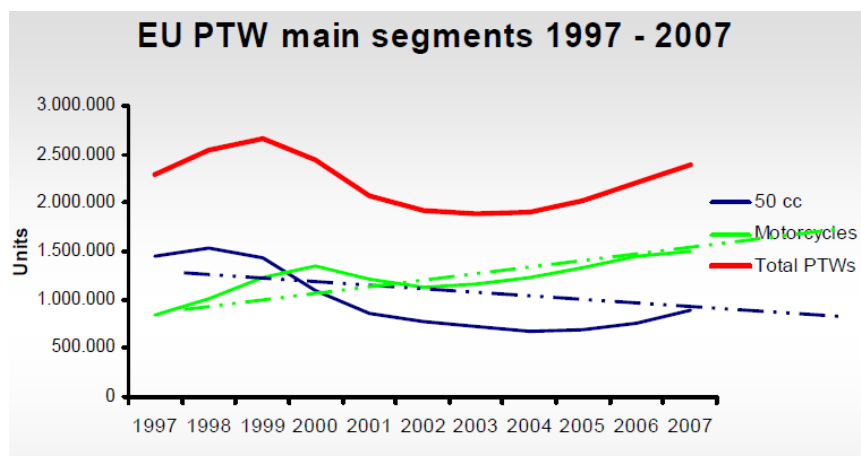
^v Consideració feta per l'estudiant basada en dades de pol·lució, estils de vehicles més comuns a cada civilització i fets com la participació al Protocol de KIOTO. Cal destacar excepcions com la recent onada de demanda per part de ciutadans nord-americans a la marca d'automòbils elèctrics TESLA





Il·lustració 7: Vendes de PTW^{vi} i tendència del sector en període pre-crisi a la Unió Europea.

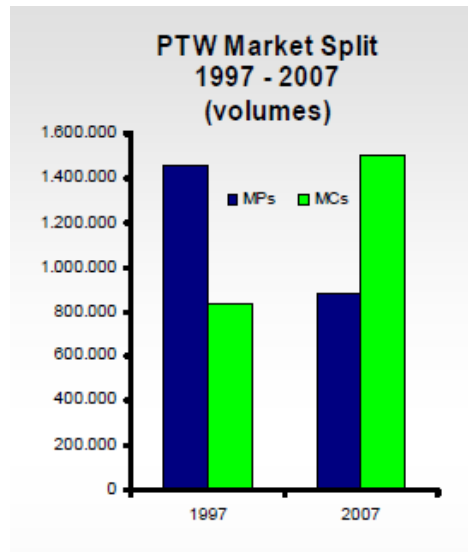
Com mostra la il·lustració 7, les vendes de motocicletes i ciclomotors (motocicletes amb un motor de 50 cc) a la UE van arribar a xifres al voltant dels 2.5 milions i seguien una tendència alcista abans de l'inici de la crisi. A més, d'acord amb el següent gràfic (il·lustració 8), descartant el sector dels ciclomotors les dades relatives a la venda de motocicletes són encara més positives.



Il·lustració 8: Evolució del sector discrepant entre ciclomotors i motocicletes.

^{vi} PTW: El terme anglès Powered Two Wheelers inclou motocicletes i ciclomotors





Il·lustració 9: Evolució dels volums de mercat dels dos segments. MP: ciclomotors; MC: motocicletes

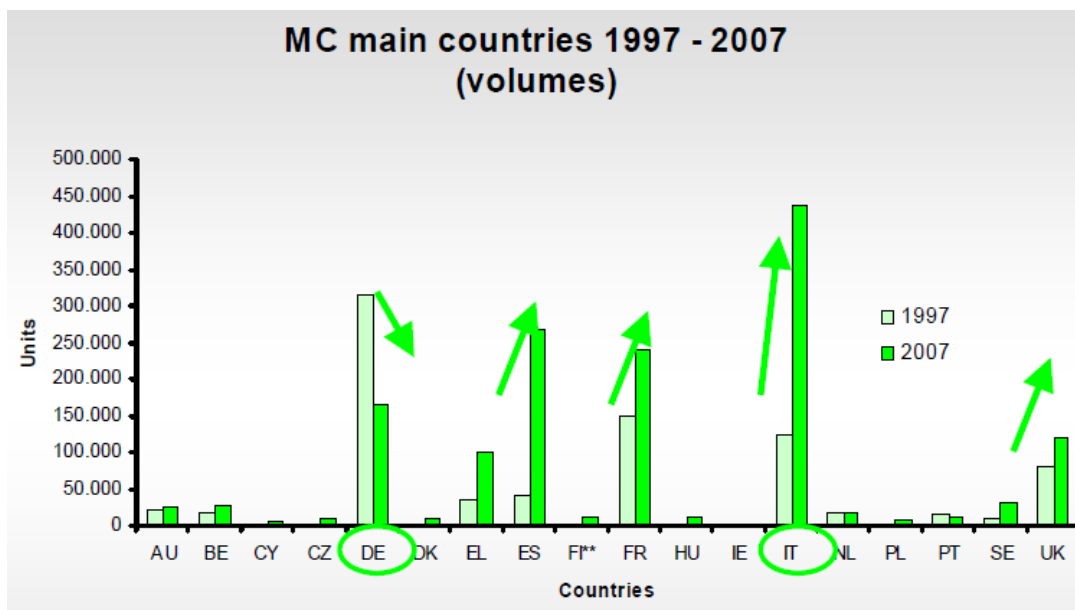
De fet, amb tant sols 10 anys de diferència les motocicletes assolixen el 63% del volum de vendes del total del sector de PTW, exactament la xifra que corresponia als ciclomotors 10 anys enrere, i és en aquesta xifra on es pot observar el clar creixement del segment.

2.2.2. Mercat Espanyol

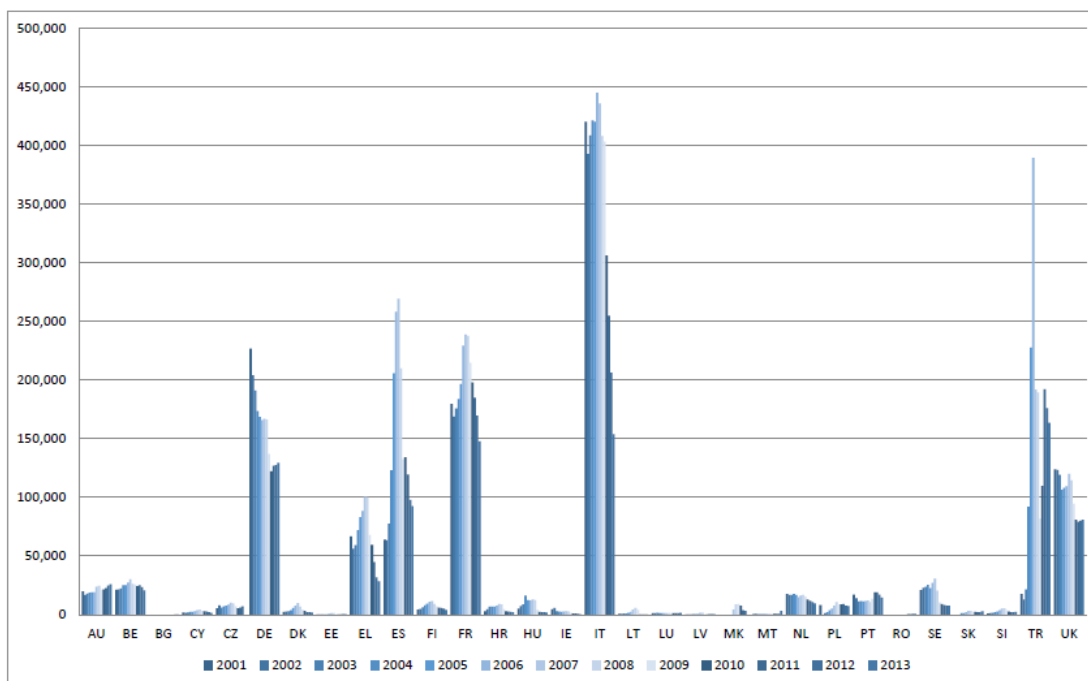
Per si les dades no fossin suficientment positives, quan entrem a diferenciar-les per països de la Unió Europea ens trobem amb Espanya com el segon mercat més important a nivell de volum (només per darrera d'Itàlia). En aquest punt cal recordar que les dades són anteriors a la crisi econòmica i que l'any 2013 Espanya va registrar un nombre de vendes que la situava a la cinquena posició d'Europa, tot hi que segueix estant a la segona en quant al total de motocicletes que circulen pel país.

Així, la il·lustració 10 mostra l'enorme creixement del segment entre els anys 1997 i 2007, mentre que a la 11 s'hi pot comprovar que la situació d'Espanya respecte els seus veïns Europeus durant la crisi la fa caure fins la cinquena posició.





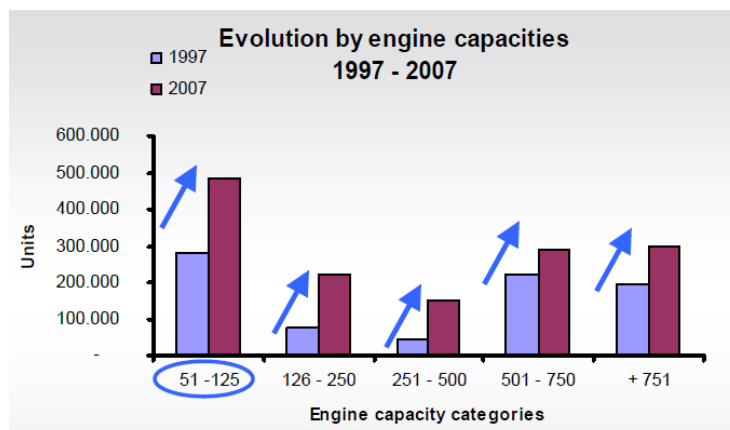
Il·lustració 10: Evolució del segment motocicletes als diferents països de la UE



Il·lustració 11: Evolució del segment motocicletes del 2001 al 2013, discrepant els diferents països de la Unió

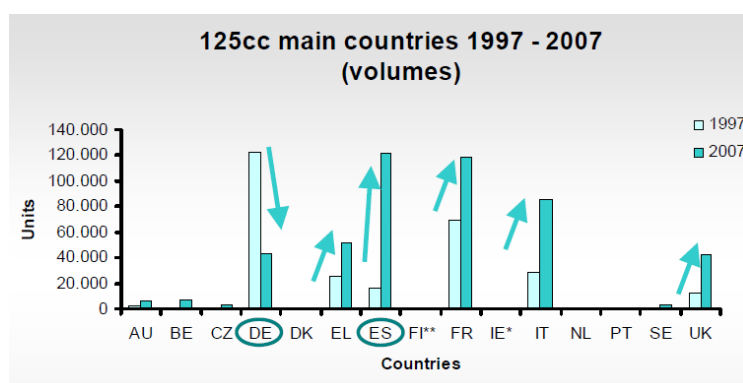
Tot hi això, Espanya segueix sent un dels principals mercats per a la venda de motocicletes i com a últim pas de l'anàlisi, es procedeix a determinar quin és el tipus de motocicleta que més sortida té actualment i amb més projecció de futur.





Il·lustració 12: Evolució del segment motocicleta a la UE per tipus de motor.

Les dades ens les dóna la mateixa agència que mostra que el segment que més creix abans de veure's afectat per la crisi, és el de les motocicletes de 125 cc o menys, seguit del de motocicletes d'entre 126 i 250 cc i fins a 500 cc.



Il·lustració 13: Evolució del segment 125 cc per països de la UE.

A més, quan s'entra a analitzar el segment de 125 cc, el tipus de motocicleta que més creix en volum de vendes prèviament a la crisi econòmica, es descobreix que el creixement més elevat l'experimenta Espanya, que a l'any 2007 es situa al cap davant d'Europa.



3. Disseny conceptual general

3.1. Tipus de motocicleta

D'aquesta manera, queda sostingut amb dades reals el que no era en absolut difícil d'intuir. La motocicleta s'ha instaurat en els darrers anys com un dels principals mètodes de transport en regions on el clima és favorable i, particularment, aquelles amb motor de cubicatge entre els 125 i 250 cc. És en ciutats com Barcelona on es pot observar empíricament aquesta realitat; un trànsit molt nombrós de motocicletes i especialment de les tipus Scooter^{vii} amb l'esmentat cubicatge.

Aquest vehicle permet un àgil i dinàmic desplaçament entre el dens trànsit de les grans metròpolis, estalviant molt de temps en desplaçaments i en tràmits implícits a aquests, com buscar un lloc per estacionar que sovint, a més de difícil de trobar, es localitzarà més lluny de la destinació del que a molts usuaris de cotxe els agradaria. Les grans ciutats Europees que gaudeixen de climes no extremadament freds s'han inundat de diferents models d'aquest segment de motocicleta i les marques més comunes com la japonesa Honda o la taiwanesa Kymco es fan un fart de vendre models que renoven estèticament any rere any.

Top 10 models 2013 : Spain			
Brand	Model	CC class	Type
SUZUKI	BURGMAN125	51-125cc	Motorcycle
HONDA	SH125AD	51-125cc	Motorcycle
HONDA	WW125EX2	51-125cc	Motorcycle
KYMCO	AGILITY CITY 125	51-125cc	Motorcycle
KYMCO	SUPER DINK 125	51-125cc	Motorcycle
PEUGEOT	TWEET 125	51-125cc	Motorcycle
YAMAHA	XMAX 125	51-125cc	Motorcycle
VESPA	LX 50	2-50cc	Moped
HONDA	VISION 110 (NSC110)	51-125cc	Motorcycle
PIAGGIO	LIBERTY 125 RST	51-125cc	Motorcycle

Il·lustració 14: La taula mostra els 10 models més venuts a Espanya l'any 2013.

Així, el tipus de motocicleta que en aquest treball es dissenyarà pretén ser l'equivalent a una motocicleta de combustió tipus scooter amb un motor d'aproximadament 125-150 cc. Havent vist que pràcticament tots els models del TOP10 en vendes a Espanya l'any 2013 són scooters de 125 cc, sembla un producte que d'entrada pot tenir una bona rebuda al mercat.

3.2. Especificacions i requisits del disseny

Per entrar definitivament al món de les motocicletes amb motor elèctric, s'ha realitzat primerament un benchmark de l'oferta que actualment existeix al mercat. La taula de la següent pàgina mostra diferents models que han tingut o tenen certa presència al jove segment, tot comparant les seves característiques més generals.

^{vii} Les motocicletes o ciclomotors tipus scooter (o escúter) es caracteritzen per tenir el motor i disposicions de transmissió a l'interior d'un carenat que constitueix el seient, el qual, juntament amb una base per a posar-hi els peus, permet que el conductor viatgi amb comoditat





	IMATGE	PREU [€]	PES [kg]	CAPACITAT [kWh] (Ah)	AUTONOMIA [km]	TEMPS DE RECÀRREGA [h]	TIPUS DE BATERIA	MOTOR [W] (CV)	VELOCITAT MÀXIMA [km/h]
Vectrix	VX-1	9.263	192	3.7	97	4 (100%) 2.5 (80%)	LiFePo4 125V 30 Ah	20.000 (28)	110
	VX-2	4.118	195	2.8	80	5 (100%) 3.5 (80%)	Silicona/Plomo de 48V/20A	4.000 (5.5)	65
BMW C Evolution		15.350	265	8	100	4 200V y 12A 3 200V y 16A	Li-ion	11.000 (15) 35.000 (47.5)	120
Scutum	S02_2	4.990	85+39	3 (60)	90	6 amb corrent de 10A	Li FePo4	4.000 (5.5)	85
	S02_3	5.990	85+55	4.5 (90)	120	9 amb corrent de 10A		4.000 (5.5)	85
Brammo Empulse		15.240	213	9.31	206 ciutat 93 carretera 129 comb.	3.5 (100%) 2 (80%)	Li-ion	40.000 (5.5)	177
Vortex	NWR	5.782-6.798	-	(50)	180	-	LiFePo4 84V 50 Ah	9.000 (12)	100
	SWR	4.996-5.993	-	(50)	130	-	LiFePo4 72V 50 Ah	6.000 (8)	85
	FWR	3.998-4.940	-	(50)	110	-	LiFePo4 60V 50 Ah	4.000 (5.5)	75
Emocycles Tornado 4.0		2.363	145	1.92	90 ciudad	8 (100%) 6 (80%)	Silicona 48V/40Ah	4.000 (5)	62
e-volt	Condor	6.136	163	4.32	100 ciudad	6 (100%) 3.5 (80%)	LiFePo4 72V 60Ah	12.000 (16 CV)	100
	Falcon	4.900	130	3.6	85 ciudad	6 (100%) 3.5 (80%)	LiFePo4 60V 60Ah	10.000 (14 CV)	96

BMW	Vectrix VX-1	Vectrix VX-2	Scutum S02_2	Scutum S02_3	Brammo Empulse	Vortex NWR	Vortex SWR	Vortex FWR	Emocycles Tornado	e-volt Condor	e-volt Falcon
B y A2	A2	A1	A1	A1	A	A1	A1	A1	A1	A1-A2	A1

L'anterior taula il·lustra una mostra de l'oferta del sector de les motocicletes elèctriques. Si alguna persona té pensat adquirir-ne una, tots ells són models disponibles^{viii} per a comprar. Però no totes tenen les característiques que es pretenen per a la motocicleta del projecte. La Brammo Empulse, per exemple, és una motocicleta que entrega 55 CV, té una autonomia de 200 Km per ciutat i pot circular a velocitats properes als 180 Km/h. A més, només cal veure el seu agressiu disseny per concloure que no es correspon amb el concepte desitjat. Similarment, la BMW C Evolution que sí que és un scooter (de tipus Gran Turisme^{ix}), disposa de 48 CV i pot assolir una velocitat màxima limitada electrònicament a 120 km/h. A la web www.bmw-motorrad.es es poden consultar moltes dades tècniques del model amb detall, i entre altres coses s'hi troba que té una autonomia de 100 km aproximadament que aprofitant al màxim la tecnologia de recuperació d'energia, la qual s'explicarà en posteriors apartats, podria augmentar fins en un 20%.



Il·lustració 15: Brammo Empulse R (esquerra) i BMW C Evolution.

De la mateixa manera, al Benchmark que s'ha fet també s'hi han trobat models que es quedaven curts a nivell de prestacions i demés característiques de disseny. En aquest treball, no obstant, es tracta només el sistema elèctric de la moto. Així, la Vectrix VX-2, els models de Scutum o les Vortex SWR i FWR, atorguen potències del voltant dels 6 CV, limitant les seves velocitats a valors de l'ordre dels 70 km/h, més semblants a les d'un ciclomotor que a les d'una motocicleta de combustió 125-150 cc.

Però el que sí és destacable en gaire bé la totalitat dels models del benchmark és que la combinació entre el voltatge de les bateries i la seva capacitat es tradueix en autonomies de més de 100 km, una dada no sempre extraordinàriament positiva si es pretén sortir de l'entorn de la ciutat, però si acceptable.

Havent repassat l'oferta del mercat i les dades tècniques dels models que podrien ser la competència de la motocicleta que ens ocupa, s'elabora una especificació amb les característiques objectiu i límit del producte objecte del treball.

^{viii} Totes excepte Vectrix, empresa que va tancar el desembre de 2013

^{ix} Les scooters tipus Gran Turisme es caracteritzen per no oferir una base plana i homogènia per on poder desplaçar i recolzar els dos peus. Per contra, tenen una estructura entre les dues cames i a una alçada lleugerament més baixa que la del seient que incomunica les zones on recolzar els peus (veure il·lustració 15 dreta (BMW C Evolution))



ESPECIFICACIONS DESITJADES DEL SISTEMA ELÈCTRIC-ELECTRÒNIC		
	Objectiu	Límit
Motor		
Potència nominal	12 kW (16.3 CV)	10 kW (13.5 CV)
Potència màxima	30 kW (40.7 CV)	20 kW (27.1 CV)
Parell màxim	65 Nm	55 Nm
Compatibilitat amb carnets	A1	A2
Prestacions i consum		
Velocitat màxima	120 km/h	100 km/h
Acceleració de 0 a 50 km/h	4 s	6 s
Acceleració de 0 a 100 km/h	7 s	9 s
Autonomia per ciutat	150 km	110 km
Autonomia per carretera	90 km	70 km
Autonomia mitja	130 km	110 km
Sistema elèctric		
Capacitat de la bateria	50 Ah	40 Ah
Tensió de la bateria	88,8 V	74 V
Temps de càrrega	3 h	4 h

I tenint la proposta d'especificacions objectiu, es procedeix a elaborar el disseny conceptual del sistema elèctric, on es perseguirà assolir aquestes amb la màxima precisió possible, tot tenint en compte que en cap cas es podria creuar el límit establert al quadre d'especificacions, doncs significaria quedar fora del segment escollit o greument eclipsats per la competència.



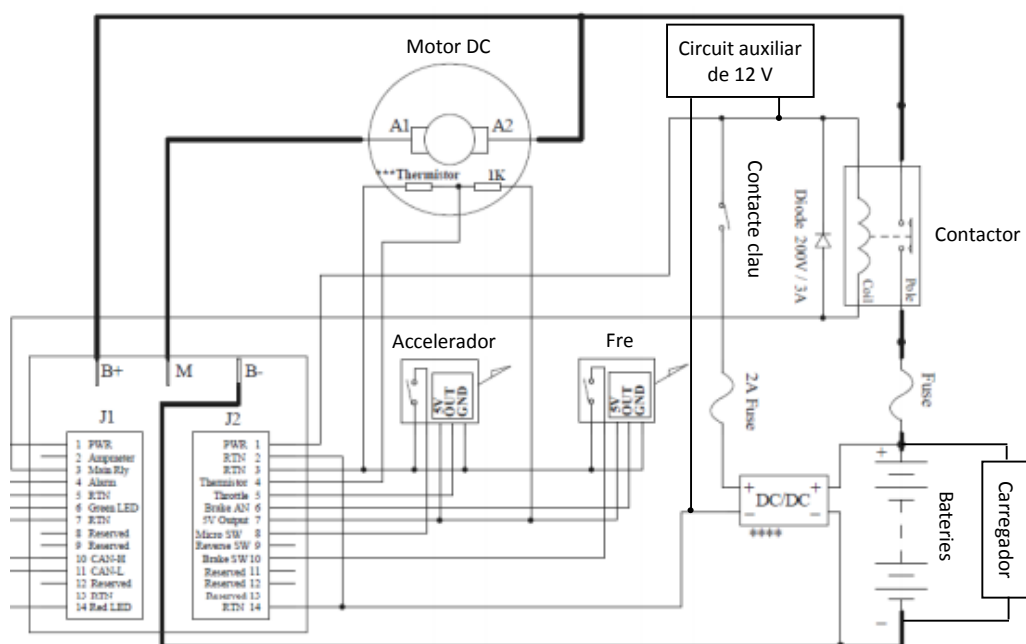
4. Disseny del sistema elèctric

El disseny del sistema elèctric s'enfoca a assolir les especificacions desitjades per a la motocicleta. Admetent que com a sistema elèctric-electrònic s'entenen tots aquells components de la motocicleta que subministren, transporten o utilitzen energia elèctrica, es pot apreciar la complexitat del que s'aborda.

Per encarar de forma clara l'explicació del disseny realitzat i el procediment que s'ha seguit, es divideix aquest capítol en quatre punts la lògica dels quals a continuació s'explica. Primerament, es començarà presentant l'esquema de conjunt del sistema. A continuació, s'identificaran tots els components que el componen per procedir amb les explicacions corresponents a cadascun d'ells. Aquesta explicació inclourà el *què* és el component i *com* funciona, quins candidats es van considerar per a formar part del sistema i quin d'ells és l'elegit per a formar part de la motocicleta, tot degudament detallat i justificat. Per acabar, es realitzarà una simulació dinàmica on s'alteraran les variables controlables per tal d'ajustar les especificacions finals a l'objectiu establert a l'apartat anterior.

4.1. Esquema de conjunt

A continuació es mostra l'esquema de conjunt del sistema elèctric, amb tots els components que durant el projecte s'han anat escollint.



Il·lustració 16: l'esquema de conjunt està adaptat de l'esquema de connexions proporcionat per les instruccions d'ús del controlador Kelly.

4.2. Identificació de components

Com es pot observar a l'esquema anterior, els components que formen el sistema elèctric de la motocicleta són diversos i variats, raó per la qual es procedeix a categoritzar-los segons els tres següents grups:



- Components bàsics: aquells components directament responsables de fer que la motocicleta es mogui seguint les ordres del pilot. Particularment, són:
 - Motor
 - Bateria
 - Controlador
 - Controls (accelerador i fre)
 - Fre regeneratiu (no és físicament un component)
- Components d'alimentació: aquells components encarregats de subministrar l'energia elèctrica i distribuir-la per tot el sistema. Concretament:
 - BMS (no visibles a l'esquema)
 - Carregador
 - Cablejat
 - Contactor general
- Components auxiliars: són els components elèctrics dels quals disposa qualsevol vehicle homologat per a circular per les vies públiques. Els vehicles molt luxosos, en tenen més. En el cas de scooters es refereix a components tals com:
 - Convertidor DC-DC (només en el cas de vehicles elèctrics que han de convertir el potencial de les bateries al requerit pel circuit auxiliar)
 - Llums (frontal, de fre, intermitents)
 - Tacòmetre i demés indicadors
 - Clàxon
 - Sortida de 12 V

Seguidament, es passa a aprofundir sobre la teoria i demés qüestions relatives a cada component.

4.3. Components bàsics

4.3.1. Motor

Un motor elèctric és un mecanisme que transforma energia elèctrica en energia mecànica aprofitant fenòmens electromagnètics. Existeixen nombrosos tipus, classificats tant per la seva construcció com pel seu funcionament o alimentació. A continuació s'estudien els diferents tipus i el seu funcionament, així com les principals avantatges i inconvenients de cadascun.

4.3.1.1. Motor d'inducció

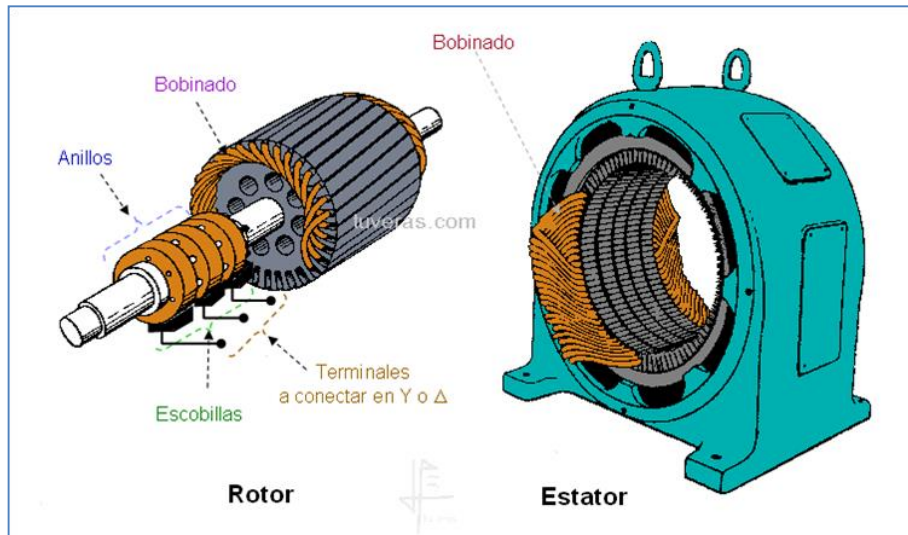
A diferència de la resta de màquines elèctriques rotatives, als motors d'inducció o asíncrons no existeix corrent conduïda directament cap al motor. Per contra, aquesta es deu a la força electromotriu induïda al rotor pel flux generat a l'estator.

Un motor d'inducció pot funcionar com a generador i com a motor. Com a generador, s'utilitza comunament a algunes petites centrals hidroelèctriques o eòliques. Com a motor, en canvi, té un rang molt ampli d'aplicacions i és el motor elèctric més utilitzat a la indústria.

Gràcies als forts avenços de l'electrònica de potència, que han desenvolupat dispositius capaços de controlar la màquina asíncrona amb la precisió requerida a multitud de processos, aquesta ha



desbancat a la màquina de corrent continu a molts sectors de la indústria. No obstant, la màquina asíncrona roman fora de l'abast d'alguns processos degut a la inexistència d'un control capaç de controlar-la amb la precisió exigida. Aquests processos són els que treballen amb grans potències i/o han de controlar una velocitat amb molt alta precisió. Quan la càrrega mecànica sobre el motor és molt gran i es redueix la velocitat, el motor podria quedar fora de fase de la freqüència del corrent i, en conseqüència, parar-se.



Il·lustració 17: Rotor i Estator d'un motor d'inducció. Font: artinaid (<http://www.artinaid.com/>)

Els motors d'inducció es classifiquen segons el tipus d'alimentació, que pot ser monofàsica o trifàsica. Es podria entrar a explicar els detalls de cadascun d'ells, així com els detalls dels diferents motors d'inducció catalogats per tipus de rotor, però com s'ha dit anteriorment, la principal desavantatge d'aquests motors afecta directament al projecte que ens ocupa, doncs una motocicleta requereix d'un control molt precís de les revolucions del motor en tot el rang de velocitats que aquesta abasteixi.

De totes formes, s'anomenen seguidament les principals avantatges i inconvenients de la màquina síncrona.

Les avantatges principals són:

- Per sobre de tot, la seva simplicitat, que es tradueix en un cost reduït tant del producte en sí com del seu manteniment.
- Bones prestacions amb l'ús de variadors electrònics de velocitat mitjançant l'ajust de freqüència de l'alimentació a l'estator.
- En general, millor rendiment que els motors de corrent continu, ja que els motors asíncrons no tenen escombretes, principal punt de pèrdua d'energia per efecte Joule dels motors DC.

I els inconvenients:

- Els variadors necessaris per al seu control són cars.
- Funcionen amb corrent alterna. Això no hauria de ser una desavantatge si no fos perquè la font d'alimentació de les motocicletes elèctriques són bateries, i aquestes subministren



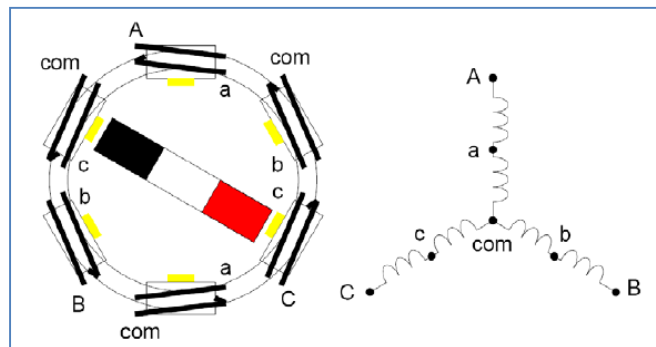
electricitat en corrent contínua. Per tant, es necessitaria un convertidor electrònic de potència DC/AC exclusivament per alimentar al motor.

4.3.1.2. Màquina de contínua sense escombretes o brushless (BLDC)

El motor BLDC^x és un tipus de motor síncron alimentat amb corrent contínua. Això vol dir que la rotació de l'eix rotor està sincronitzada amb el camp magnètic creat per l'estator. Al no tenir escombretes ni col·lector, aquest motor és molt utilitzat en aplicacions on el desgast de les escombretes és molt elevat i pot suposar un problema. Les corrents són commutades electrònicament a l'estator creant un camp magnètic que és responsable del moviment del rotor.

El funcionament d'un motor BLDC és per mitjà de la commutació estratègica de les bobines de l'estator que s'utilitza per a alterar l'orientació del camp magnètic i així controlar el moviment del rotor. En aquest cas, els imants permanents estan al rotor i el bobinat a l'estator, contràriament als motors de CC amb escombretes.

El control del motor, així, és un control electrònic que es basa en la commutació del corrent de les bobines de l'estator. Per mitjà d'aquest control, a més, es podria decidir la direcció de rotació del rotor. Augmentant el nombre de pols del motor i, conseqüentment augmentant el nombre de bobines de l'estator, s'aconsegueix millorar el seu rendiment i l'estabilitat del parell a baixes velocitats (com més fases tingui el motor, més precís serà a baixes rpm)



Il·lustració 18: Esquema de funcionament del motor BLDC per a 3 fases i 2 pols. Font: artinaid (<http://www.artinaid.com/>)

Avantatges d'aquest tipus de motor:

- Menor necessitat de manteniment degut a l'absència d'escombretes
- Vida útil llarga
- Millor eficiència degut al menor efecte Joule
- Baixa inèrcia del motor (millor resposta)
- Menor soroll

^x BLDC: Brushless Direct Current Electric Motor



Desavantatges:

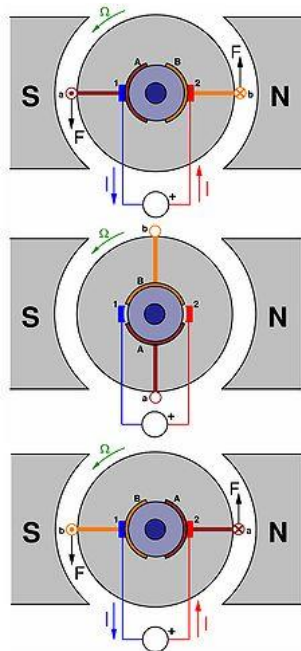
- Complexitat de control
- Preu elevat degut als imants permanents i al seu control

En definitiva, no seria una mala opció si es tingués entre mans un projecte on el producte a desenvolupar fos una motocicleta d'alt rendiment (de competició per exemple). Però tractant-se d'una motocicleta que ha de mantenir un preu competitiu i on les especificacions no són tant exigents, no val la pena invertir en un motor BLDC.

4.3.1.3. Motor de contínua amb escombretes

És un motor rotatiu de corrent contínua que pot funcionar com generador i com motor. L'ús com a generador és més aviat reduït, sobre tot conegut per a exercir de dinamo taquimètrica. Com a motor, com s'ha dit, en els últims anys ha sigut fortament eclipsat pels motors d'inducció, no obstant, sembla una de les millors opcions per a la motocicleta, tenint en compte que la majoria de fabricants de motocicletes similars utilitzen aquest tipus de motors.

Un motor de corrent directa produeix parell gràcies a la commutació mecànica del corrent. A la il·lustració 18, existeix un camp magnètic permanent produït pels imans de l'estator. El flux del corrent del bobinat del rotor produeix la força electromotriu. Degut a que en aquest cas el motor té dos pols, la commutació es fa mitjançant un anell partit per la meitat on el flux del corrent s'inverteix cada mitja volta (180 graus). Naturalment això és un esquema i en un motor amb escombretes (que són les encarregades d'exercir la commutació), aquestes poden ser molt nombroses augmentant així la estabilitat del parell a baixes revolucions.



Il·lustració 19: Esquema de funcionament d'un motor CC. Autor: Miguel Angel Rodríguez Pozueta

A la imatge anterior, es mostra el motor en tres posicions del rotor desfasades 90° entre sí. Els elements representats són les escombretes (1, 2), l'anell particionat (A, B) i el bobinat (a, b).



Les avantatges principals d'aquest tipus de motor són:

- Bona resposta del motor davant requeriments exigents de parell en un ampli rang de velocitats i càrrega, és a dir, gran flexibilitat parell-velocitat.
- Control simple i gran exactitud a l'hora de mantenir una determinada velocitat.
- Alt rendiment
- Més econòmics que els BLDC

I els punts dèbils:

- Les escombretes requereixen manteniment
- Es produeixen pèrdues per efecte Joule degut a la commutació física al contacte entre escombretes i anell.

S'ha comentat que aquests motors han sigut fortament eclipsats pels motors d'inducció en aplicacions industrials d'alta potència. No obstant, actualment es fan motors DC amb escombretes reposables que minimitzen el punt feble del manteniment, a més de presentar una molt alta eficiència i un fàcil control i ser més econòmics que els anteriors. Per a aquests motius i degut al seu eficaç control i parell en velocitats reduïdes, és la opció més adient. Per últim, el fet que s'alimentin amb corrent contínua facilita la seva implementació al rebre energia de bateries (DC).

4.3.1.4. Equacions que regeixen el moviment d'un motor CC

Un motor elèctric de corrent contínua transforma potència elèctrica (igual al producte de la diferència de potencial i la intensitat al que se'l sotmet) en potència mecànica (igual al producte del parell que es capaç d'atorgar i la velocitat del motor). Es regeix fonamentalment per les tres equacions que segueixen:

Tensió induïda

$$E = K_e \cdot \omega_{motor}$$

On E és la tensió induïda al motor en [V], K_e és la constant de velocitat del motor en [V/rpm] i ω_{motor} és la velocitat del motor en [rpm]

Parell

$$\tau = K_t \cdot (I_r - I_0)$$

El parell del motor és igual al producte de la constant de parell del motor K_t en [Nm/A] i la intensitat que hi circula I_r [A]. El terme I_0 és descompta ja que representa el valor d'intensitat en [A] necessari per a vèncer les resistències internes del motor i que aquest pugui començar a girar.

Malla

$$V = E + R \cdot I$$

Així, la diferència de potencial a la que es sotmet un motor és repartida entre la tensió induïda, responsable de donar velocitat al motor, i la Intensitat que hi circula, que com s'ha vist és la encarregada de subministrar parell al motor.



Per exemple, quan la motocicleta estigui aturada o amb velocitats properes a 0, el terme E serà molt petit i per tant circularà una alta intensitat pel motor que li atorgarà un parell elevat. Contràriament, a altes velocitats la tensió induïda serà més elevada, la intensitat que hi circularà més reduïda i consegüentment el parell del motor serà molt inferior.

Potència

$$V \cdot I = K_e \cdot \omega_{motor} \cdot I + R \cdot I \cdot I$$

$$P_{elèctrica} = P_{mecànica} + P_{dissipada}$$

Per últim es mostra l'equació de la potència, on es pot comprovar que la potència subministrada pel motor elèctric s'inverteix en potència mecànica i potència dissipada per efecte Joule.

4.3.1.5. Candidats considerats i elecció

Després d'un exhaustiu procés de cerca de motors de CC amb escombretes pensats per aplicacions d'automoció, s'han considerat finalment dos possibles candidats que a continuació es nombren. Els seus detalls tècnics complets es troben a l'annex:

Lynch Motor Company Ltd (Serie LEM-200, Model D127)

Aquest motor d'armadura de disc és un motor pensat per a aplicacions industrials i de tracció. Alguns exemples que menciona el fabricant són: Go-Karts, motocicletes, cotxets de golf, altres vehicles de poc pes, petites embarcacions i generadors. El motor es presenta en diferents models (en funció de la potència que interressi) i algunes de les característiques principals són:

- Alta eficiència (propera al 93%)
- Baix pes (11 Kg aproximadament)
- Control electrònic simple
- Alta durabilitat de les escombretes
- Disseny robust

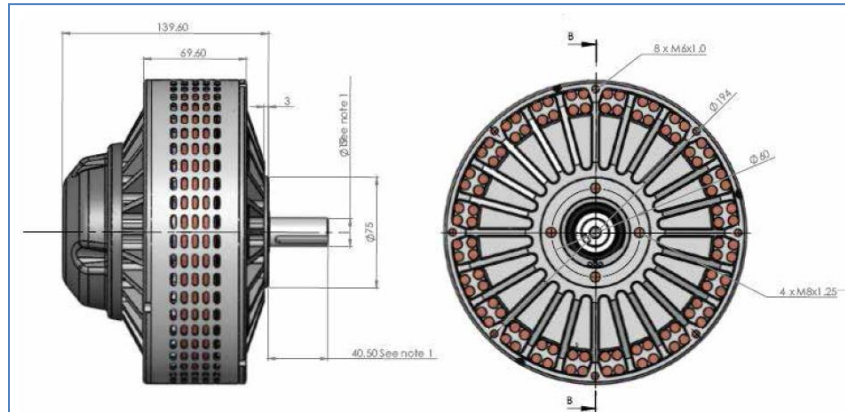
D'acord amb les especificacions desitjades (15 CV aproximadament), el model adient seria el D127. Les característiques tècniques que presenta són les següents:

DADES TÈCNIQUES MOTOR LMC LEM200-D127												
Intensitat residual	Constant de parell	Constant de velocitat	Constant de resistència	Inèrcia	Potència de P _{IC}	Eficiència de P _{IC}	Màxima Intensitat	Potència mitja	Velocitat mitja	Voltatge mitjà	Corrent mitja	Parell mitjà
A	N·m/A	Rpm/V	mOhm	Kg·m ²	kW CV	%	A	kW CV	Rpm	V	A	Nm
4	0,17	50	17,5	0,0236	25,38 34,5	92	400	12,56 17,07	3600	72	200	33,3

Les dades ombrejades en blau són les constants que s'utilitzen en les equacions que regeixen el motor, les quals s'han vist anteriorment (I_0 , K_t , K_e i R respectivament). La inèrcia s'utilitza per a calcular l'increment de pes al conjunt de la motocicleta provocat pel moviment del motor. A l'apartat de la simulació dinàmica s'explicarà amb detall com s'han aplicat aquestes equacions i constants. Ombrejats



en vermell apareixen els valors de pic. Per últim, en verd, es mostra la relació de valors als que el motor opera amb l'exigència òptima de treball.



Il·lustració 20: Aspecte i dimensions del motor LMC LEM-200 D127

AGNI Motors 143

Els orígens de LMC i de Agni motors tenen força en comú, per qüestions relacionades amb els enginyers que hi treballen però que no venen al cas. La qüestió és que LMC fa motors molt similars a Agni, i ambdues empreses són punteres i molt conegudes en el sector EV^{xi}. El motor que es considera, considerant com sempre les especificacions objectiu, és el model AGNI 143, també un motor d'armadura de disc (els més utilitzats per a motocicletes elèctriques).

Tot hi que les especificacions són força semblants a les del motor anterior (veure gràfics de rendiment a l'annex), el motor funcionant a 84 V treballaria amb una intensitat mitja de 120 A i entregaria una potència de 13 CV. A més, la intensitat de pic que podria suportar durant un període limitat de temps és de 300 A en front dels 400 del motor de LMC. Això, com s'ha vist, tindrà una influència directa al parell del motor. Com es pot veure, les especificacions són una mica inferiors a les de la primera opció. El model superior de AGNI, la sèrie 155, es passaria sobradament per massa potent i per tant es descarta directament per no complir les especificacions desitjades. Així doncs, aquestes diferències entre les dues opcions fan que, pel risc que suposaria quedar-se curt en quant a prestacions d'acceleració, el motor escollit per a la motocicleta sigui el **LMC LEM-200 D127**.

4.3.2. Bateries

Les bateries que es fan servir en una motocicleta elèctrica, són cel·les secundàries. Aquestes poden ser recarregades, és a dir, poden invertir les seves reaccions químiques (al contrari que les cel·les primàries) mitjançant subministrament d'energia elèctrica a la cel·la, fins al restabliment de la seva composició original.

A continuació s'expliquen les característiques principals, avantatges i inconvenients dels tipus de cel·les secundàries, prescindint del seu funcionament, composició i altra informació detallada, amb l'objectiu de seleccionar la més apropiada per a una motocicleta:

^{xi} Abreviació anglesa per a Electric Vehicle



- Bateria de plom-àcid: es tracta de bateries de baix cost i fàcil fabricació, que no es caracteritzen per tenir massa durabilitat ja que el procés càrrega-descàrrega no es pot repetir indefinidament. A més, són intolerants a les sobrecàrregues i a les descàrregues profundes, altament contaminants, i proporcionen una densitat d'energia baixa: 30 Wh/kg. El voltatge proporcionat sol ser d'uns 2 V/element. Entre el baix voltatge dels elements i l'ésser aquests de plom, quan diverses cel·les s'agrupen per formar una bateria comercial el pes es torna un inconvenient. Comunament utilitzades com a bateries de vehicles de combustió, ja que en aquesta funció no haurien de realitzar cicles de descàrrega complets, és a més força comú que s'hagin de canviar cada certs anys ja que s'acaben fent malbé. Queda doncs descartada per a formar part del sistema de subministrament d'electricitat de la motocicleta.
- Bateria de níquel-ferro: aquestes bateries, de baix cost i fàcil fabricació igual que les anteriors, presenten les següents avantatges: admeten sobrecàrregues, repetides descàrregues totals i fins i tot curts circuits sense pèrdua significativa de capacitat. No són contaminants i no contenen metalls pesants. La vida útil és molt llarga, al voltant de 100 anys d'esperança de vida o uns 1000 cicles de descàrrega. La substància que fa d'electròlit ha de ser substituïda cada 20 anys aproximadament. El rang de temperatures de funcionament també és més gran (entre -40 i 46°C). El voltatge proporcionat, però, és d'entre 1.2 i 1.4 V, el que fa que es requereixi una gran cadena de bateries per arribar al voltatge que requereix una motocicleta. Aquest inconvenient fa que malgrat els nombrosos avantatges, es descarti també degut a les limitacions d'espai per a les bateries al xassís de la motocicleta.
- Bateria de níquel-cadmi i níquel-hidrur: són bateries molt similars a les anteriors. Les primeres tenen l'avantatge que admeten un gran rang de temperatures de funcionament, i que es poden seguir carregant quan estan al límit de capacitat sense veure's greument afectades. Les segones, es veuen menys afectades per l'efecte memòria^{xii}. Aquests avantatges semblen molt importants, però en proporcionar 1,2 V, es descarten per la mateixa raó que l'anterior.
- Bateria de ions de liti (Li-ió): aquestes modernes bateries que tot just pateixen l'efecte memòria tenen molt altes densitats de capacitat respecte a totes les anteriors. A més, proporcionen voltatges més alts (3 - 5 V). Tenen un inconvenient amb el qual s'ha de vigilar: no admeten descàrregues completes i pateixen molt quan aquestes succeeixen.
- Bateria de polímer de liti (LiPo): són una variació de les bateries de ions de liti. Les seves característiques són molt similars però tenen una encara major densitat d'energia, així com una taxa de descàrrega bastant superior. A més, la seva mida és més reduïda respecte a les d'altres components. Aquestes bateries, igual que les Li-ió, tenen un voltatge que varia en funció del nivell de càrrega. Així doncs, tenen un voltatge nominal de 3,7 V, màxim de 4,2 i mínim de 3 (si es descarreguen fins a donar voltatges menors a 3 V, es fan malbé irreparablement). S'acostuma a establir la següent nomenclatura: XSYP, que significa X cel·les en sèrie i Y en paral·lel. Per exemple, 3s2p són dues bateries en paral·lel, on cadascuna té 3 cel·les. En general, es venen de 1S a 4S, el que significa:

^{xii} L'efecte memòria en bateries és la pèrdua de capacitat que succeeix quan aquestes no realitzen càrregues completes. Col·loquialment, es diu que "s'obliden" de la capacitat que no fan servir. El que realment passa, és que es formen cristalls a l'interior de les cel·les que inutilitzen els reactius limitant així la seva capacitat.



- Li-PO 1S: una cel·la, 3,7 V
- Li-PO 2S: dues cel·les, 7,4 V
- Li-PO 3S: tres cel, 11,1 V
- Li-PO 4S: quatre cel, 14,8 V

Totes aquestes característiques (la major tensió per element, possibilitat de proporcionar alt voltatge, mida i pes reduït, gran durada, reduït temps de càrrega, etc), fan que aquestes siguin la millor opció per usar-les com a font d'energia en una motocicleta.

4.3.2.1. Candidats considerats i elecció

Existeixen molts fabricants de bateries de liti, com per exemple:

- Winston batteries
- A123 Systems
- Johnson Matthey Battery Systems
- Valence
- GS Yuasa
- Hitachi
- Sanyo
- NECx

No obstant, aquest és un component fonamental en una motocicleta elèctrica i molt delicat. De fet, l'emmagatzematge d'energia elèctrica és la qüestió clau en el sector EV. Una solució eficient i econòmica al "com emmagatzemar energia elèctrica" seria possiblement el detonant que iniciaria definitivament el desbancament dels combustibles fòssils en automoció.

La qüestió és que en la tria d'aquest component s'ha d'anar amb compte i evitar seleccionar un component de mala qualitat que afecti de forma greu al funcionament de la motocicleta. De fet, es diu que l'empresa Vectrix va haver de cessar la seva activitat com a conseqüència de greus defectes amb les bateries del model VX-2 un cop ja n'havia venut un nombre considerable.

Algunes de les bateries usades pels possibles competidors del producte que en aquest projecte es desenvolupa són:

Motocicleta	Características de la batería	Autonomía	Potencia
Vectrix VX-1	LFP 125 V 30 Ah	97 Km	28 CV
Vectrix VX-2	Silicona Plomo 48 V 20 Ah	80 Km	5,5 CV
Vortex NWR	LFP 84 V 50 Ah	180 Km	12 CV
Vortex SWR	LFP 72 V 50 Ah	130 Km	8 CV
BSG Generation	LFP 72 V 40 Ah	90 Km	7 CV

Com s'ha vist a les equacions que regeixen el comportament del motor, el voltatge subministrat per les bateries multiplicat per la intensitat que circula pel motor en un cert instant de temps, és igual a la potència instantània en aquella fracció de temps. Es pot veure, per tant, que independentment de la



potència nominal i màxima que el motor sigui capaç d'aportar, el voltatge subministrat per les bateries juga un paper crucial en la potència que el motor finalment entregarà.

L'altre dada bàsica que s'ha de tenir en compte en l'elecció de les bateries és la seva capacitat. Aquesta es mesura en [Ah] i fonamentalment vol dir la quantitat d'Amperes que pot subministrar la bateria durant una hora abans d'esgotar-se. Així, les bateries de la motocicleta BSG Generation trigaran una hora a descarregar-se si subministren una intensitat constant de 40 A. Com és lògic, aquest valor està directament relacionat amb l'autonomia que tindrà la motocicleta i per tant també interessa maximitzar-lo.

Per últim, a l'hora d'escollir la bateria també caldrà tenir en compte les intensitats màximes amb que les bateries podran descarregar-se (relacionat com s'ha vist amb la potència elèctrica) i carregar-se (en un intent de minimitzar el temps de càrrega d'aquestes).

WINSTON BATTERY LYP40AHA i LITHIUM ENERGY JAPAN LEV50

Les característiques d'aquestes bateries es mostren contrastades en la següent taula:

Bateria		WB-LYP40AHA	LEJ-LEV50 (GS YUASA)
Voltatge nominal [V]		2.8	3.7
Capacitat [Ah]		40	50
Corrent de descàrrega nominal [A]		3·Cap. = 120	Pot descarregar a 300 A el 90% de la capacitat d'una descàrrega a 10 A.
Corrent de descàrrega impuls [A]		10·Cap = 400	10·Cap = 500
Dimensions [mm]	Llarg	183	171
	Ample	47	44
	Alt	115	115
Massa [Kg]		1.6	1.7



II·lustració 21: bateries Winston Battery LYP40AHA.



L'empresa Xina Winston Energy Group Ltd ofereix unes bateries que, com es pot veure, tenen unes característiques menys atractives que les dels Japonesos de GS YUASA. Amb menys voltatge nominal i menys capacitat, i amb dimensions una mica més grans i pes molt similar, l'elecció és força clara. Cal dir que la bateria LEV50 és actualment una de les millors bateries de liti amb aplicacions EV i que marques com Mitsubishi Motors i HONDA ja les utilitzen en els seus productes del segment EV.

A més, com es pot comprovar, la cel·la LEV50 té unes especificacions molt adients en relació a les del motor escollit. Recordant que la placa de característiques del motor especificava 400 A de corrent de pic i 200 A de corrent nominal, es pot veure que els 500 A de descàrrega de pic i els 300 A de descàrrega còmode de la bateria donen marge per a poder utilitzar tranquil·lament el motor en ambdues condicions.

Per últim, seleccionem un nombre parell^{xiii} de bateries buscant el voltatge adequat que subministraran connectades en sèrie.

Es decideix incorporar a la motocicleta 24 bateries que proporcionaran un voltatge de $24 \cdot 3,7 = 88,8$ V, sabent que el voltatge nominal del motor són 72 V. Això vol dir que quan es sol·licitin a la motocicleta màximes prestacions, el motor rebrà un increment de potencial igual a 88,8 V.

Així doncs, la motocicleta disposarà de **24 bateries LEV50 amb 88,8 V i 50Ah**.



Il·lustració 22: bateries GS YUASA LEV50.

En quant al temps de càrrega, dir que serà d'aproximadament unes 4 hores tot hi que aquesta qüestió es tracta a l'apartat del carregador.

4.3.3. Controlador

Les tècniques de control de motors DC, són eines que s'utilitzen per a controlar la velocitat, el parell i el subministrament de potència dels motors de corrent continu. El control de motors és un àmbit de l'electrònica de potència i s'acostuma a dur a terme mitjançant tiristors^{xiv}.

La majoria de motors utilitzats a la indústria es connecten directament a les línies de distribució elèctrica. Les terminals dels bobinats del motor (rotor o estator en funció del tipus), reben per tant un increment de potencial constant a l'entrada i les seves característiques d'operació es mantenen

^{xiii} Parlat amb Borja Soler, un nombre parell facilita la seva incorporació al xassís.

^{xiv} El tiristor (un tipus de transistor), altrament conegut com a díode SCR és un component electrònic constituït per elements semiconductors que té la capacitat d'actuar com a conductor o aïllant (equivalent a un interruptor mecànic), sota les ordres que se li donin.



inalterables. Es diu que el motor treballa en condicions nominals quan s'alimenta amb la tensió indicada a la seva placa de característiques, entregant per tant una potència constant a la càrrega engranada a l'eix.

En aquest cas, la naturalesa de la càrrega definirà el comportament del motor. Per al cas d'una càrrega lleugera, el motor assolirà altes velocitats mentre que el parell de gir es mantindrà en valors reduïts. Contràriament, si es tracta d'una càrrega molt pesant la velocitat assolida serà menor però el motor desenvoluparà un fort parell, doncs així ho requerirà la càrrega. No obstant, amb el motor connectat directament a la xarxa, si la càrrega es manté constant també es mantindrà constant la operació del motor sense possibilitats d'influir en la velocitat d'aquest (doncs la tensió d'entrada no es veurà modificada).

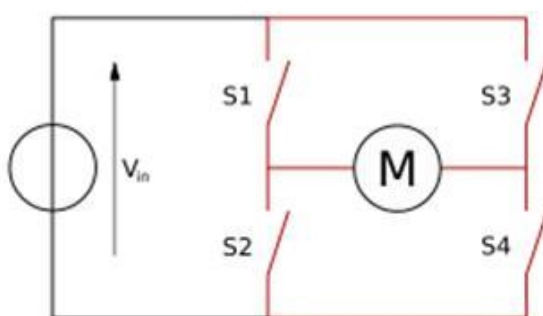
Així doncs, en el cas d'una motocicleta elèctrica alimentada per bateries es tindrà una font d'energia que subministrarà un increment de potencial constant^{xv}, provinent de les bateries. Però en aquest cas, és fonamental tenir un control sobre el motor independentment de la càrrega que aquest hagi de moure (notar que aquesta no serà sempre constant, doncs un canvi en el pendent de la via o de les condicions climatològiques són només dos exemples on l'entorn influirà directament a la càrrega a moure pel motor).

Els controladors de motors DC són dispositius d'electrònica de potència que es connecten entre la font d'energia i el motor. Consisteixen en circuits de diferent complexitat formats principalment per transistors i tenen com a objectiu el control de la velocitat i parell del motor, mitjançant l'alteració del subministrament de potència que aquest rebrà de la font d'energia (voltatge).

A continuació s'expliquen les tècniques més utilitzades per a controlar motors elèctrics.

4.3.3.1. Pont en H

Es tracta d'un circuit electrònic que permet a un motor DC girar en els dos sentits. Àmpliament usats en robòtica i com convertidors de potència, deuen el seu nom a la seva representació gràfica.



Il·lustració 23: representació gràfica d'un pont en H.

^{xv} A l'apartat on es tractin els BMS es comprovarà que això no és ben bé així, tot hi que l'objectiu serà limitar el rang de voltatge que aquestes ofereixin.



Es poden adquirir com circuits integrats o bé construir-se a partir de components discrets. Es tracta d'un circuit amb 4 interruptors (mecànics o transistors), i en funció de la combinació ON / OFF que s'apliqui s'aconsegueix un efecte o un altre:

S1	S2	S3	S4	Resultado
1	0	0	1	Avance
0	1	1	0	Retroceso
0	0	0	0	Sin corriente
1	0	1	0	fast-stop

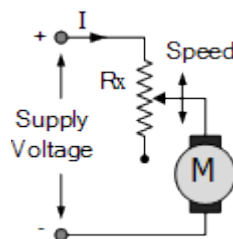
4.3.3.2. Pulse Width Modulation (PWM)

Com s'ha dit, en un motor DC d'imants permanents com el que es tracta, el moviment s'aconsegueix amb la interacció del camp magnètic produït pels imants permanents de l'estator i el camp magnètic que crea el bobinat del rotor i que es va commutant mecànicament mitjançant les escobretes.

Així doncs, la velocitat de rotació d'un motor de CC depèn de la interacció entre dos camps magnètics, un establert pels imants permanents de l'estator i l'altre pels bobinats del rotor giratoris que actuen d'electroimants. Mitjançant el control d'aquesta interacció es pot controlar la velocitat de rotació.

El camp magnètic produït pels imants permanents de l'estator es fix i per tant no es pot canviar, però si es canvia la magnitud del camp electromagnètic del rotor mitjançant el control del corrent que flueix a través dels debanats, es produirà més o menys flux magnètic que resultarà en una interacció més forta o més feble i, per tant, una velocitat més ràpida o més lenta.

Per tant, l'objectiu, és controlar la intensitat que passa pel bobinat del rotor i que prové de les bateries, les quals ofereixen un increment de potencial constant. La manera més senzilla de fer-ho, és utilitzant reòstat^{xvi} en sèrie amb el motor com mostra la següent imatge.



Il·lustració 24: circuit amb font d'energia, reòstat i motor en sèrie.

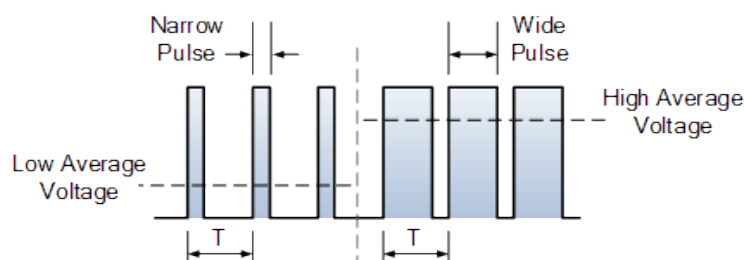
Aquesta tècnica és utilitzada, per exemple, en els cotxes de Scalextric per a controlar la seva velocitat, atorgada amb motors DC. Però, naturalment, aquest tipus de circuits desprenen molta calor i dissipen molta energia, pel que a banda de ineficient, resulta impossible la seva aplicació en aplicacions EV.

Una altra manera simple de controlar la velocitat d'un motor DC mitjançant la regulació de la intensitat que circula pel bobinat és PWM (Pulse Width Modulation), és a dir, modulació del gruix del pols: la idea bàsica és que usant un circuit electrònic amb transistors adaptat a un circuit de pont en H, es pot

^{xvi} Aparell o dispositiu consistent en una resistència variable que hom pot ajustar o regular a voluntat.



transmetre al motor un senyal de polsos digital de més o menys gruix on 1 serà el voltatge de la font (bateries) i 0 serà el potencial base-emisor dels transistors (generalment 0.7 V si són de silici, clarament insuficient per a moure el motor). Modulant el temps en què el mantenim en aquestes posicions, podem transmetre al motor un senyal de polsos de més o menys gruix. Entenent el gruix del pols com el temps t que el transistor es manté en la posició ON, com més gran sigui $t < T$ (període), més diferència de potencial se li transmetrà al motor. Per contra, com més petit sigui $t > 0$, menor serà el voltatge transmès.



Il·lustració 25: esquema representatiu d'el tren de polsos i el senyal que rebirà el motor.

4.3.3.3. Candidats considerats i elecció

Així doncs, es cerca un controlador per a un motor DC amb escombretes de 72 V de voltatge nominal, tot i que podrà treballar als 88,8 V de les bateries, i pel que hi podrà circular una intensitat de pic de 400 A (veure especificacions del motor escollit). La idea bàsica és que el controlador ha de poder treballar amb aquests valors de voltatge i intensitat màxims sense patir.

A més, cal tenir en compte que es desitja que la motocicleta pugui recuperar energia de les desacceleracions (fre regeneratiu). Aquesta és una característica dels motors elèctrics que poden actuar com a motor i generador, com és el cas dels motors DC amb escombretes, i que s'explica a l'apartat corresponent. En tot cas, el que cal assegurar és que el controlador pugui treballar als següents dos dels quatre quadrants d'un motor elèctric (que també s'expliquen a l'apartat de fre regeneratiu): anar cap endavant accelerant o mantenint la velocitat i anar cap endavant reduint la velocitat.

LMC Ltd Alltrax SPM72500



Il·lustració 26: controlador Alltrax SPM72500.

La sèrie de controladors per a motors DC amb escombretes de LMC ofereix un rang molt ampli de controladors en funció del voltatge subministrat per les bateries. El model que podria ser útil per a la motocicleta té les següents especificacions:

Voltatge bateries	Voltatge màxim	I mitja 2 minuts	I mitja 5 minuts	I mitja 1 hora
24-72 V	90 V	500 A	350 A	200 A



SEVCON GEN4

Il·lustració 27: controlador SEVCON GEN4.

Un altre candidat és el controlador de la marca SEVCON, amb les següents especificacions:

Voltatge bateries	Voltatge màxim	I mitja 10 segons	I mitja 1 hora
60-72 V	90 V	480	150 A

Kelly Controls KDH12601E

Il·lustració 28: controlador Kelly KDH12601E.

Per últim, mostrem un altre possible candidat a muntar a la motocicleta amb les següents característiques:

Voltatge bateries	Voltatge màxim	I mitja 1 minut	I mitja 1 hora
24-120 V	136 V	600 A	300 A

Entenent que les bateries proporcionen un voltatge de 88,8 V, molt proper als 90 que limiten ambdues primeres opcions, i que el corrent de pic i mitjà del motor són 400 i 200 A respectivament, es considera la tercera opció com la més adient pel marge de seguretat que proporciona. S'assegura així un correcte manteniment del controlador.

A més, el controlador admet administrar la regeneració d'energia quan el motor es trobi funcionant al segon quadrant, i es caracteritza per realitzar un PWM molt eficient (99%), limitant així les pèrdues d'energia de les bateries i l'escalfament del sistema. Segons les característiques explicades pel



fabricant, el controlador treballa a màxim rendiment entre 0 i 50°C i pot operar entre -30 i 90°C. A 100°C s'apaga automàticament per excés de temperatura. La fitxa tècnica es troba juntament amb la dels demés components a l'annex.

4.3.4. Controls

Hi ha dos controls que tenen importància en el control d'una motocicleta elèctrica i que formen part del seu sistema elèctric. Un és l'accelerador, i l'altre fre. Si, el fre també forma part del sistema elèctric, ja que com es veurà a l'apartat "fre regeneratiu" quan aquest s'acciioni el controlador haurà de rebre una senyal que li indiqui que ha de començar a administrar corrent cap a les bateries. Així, el fre s'explica al seu propi apartat.

4.3.4.1. Accelerador

Respecte a l'accelerador, dir que és un component relativament senzill de la motocicleta. Bàsicament és un potenciòmetre. Un potenciòmetre que, en aquest cas, es basa en una resistència variable (reòstat) el valor de la qual depèn de la rotació del mànec accelerador.

Senzillament s'ha de buscar un accelerador que pugui funcionar amb el controlador escollit. Al consultar la fitxa del controlador es pot veure que admet com a acceleradors potenciòmetres de menys de 100 kOhm (100.000 Ohm de resistència màxima).

MAGURA TWIST GRIP THROTTLE

L'accelerador per a motocicletes elèctriques de Magura és un accelerador per a la mà dreta (sentit de rotació adient) que a màxima acceleració ofereix una resistència de 5000 Ohm. Disposa de dos cables (entrada i sortida del circuit) els quals van connectats al controlador, amb el que ja s'ha comprovat que és compatible



Il·lustració 29: MAGURA THROTTLE.

4.3.5. Fre regeneratiu

El fre regeneratiu és una característica dels motors que poden actuar com a motor i com a generador. La idea és aprofitar els moments en que el motor DC pugui actuar com a generador per recuperar energia en forma d'intensitat i d'aquesta manera carregar les bateries.

Per a entendre el concepte de fre regeneratiu, cal primer explicar quins són els quadrants de treball d'un motor DC.



2n Quadrant Anar cap endavant frenant	1r Quadrant Anar cap endavant
3r Quadrant Anar cap enrere	4t Quadrant Anar cap enrere frenant

Per entendre que està passant amb el motor a cada quadrant, cal recuperar les tres equacions que regeixen el seu moviment. Aquestes eren:

Tensió induïda

$$E = K_e \cdot \omega_{motor}$$

Parell

$$\tau = K_t \cdot (I_r - I_0)$$

Malla

$$V = E + R \cdot I$$

En realitat, l'eix vertical del gràfic anterior representa la tensió induïda E , mentre que l'eix X representa la intensitat que circula pel motor I . D'aquesta manera, el gràfic quedaria així:

2n Quadrant Anar cap endavant frenant ($I < 0$, $E > 0$)	1r Quadrant Anar cap endavant ($I > 0$, $E > 0$)
3r Quadrant Anar cap enrere ($I < 0$, $E < 0$)	4t Quadrant Anar cap enrere frenant ($I > 0$, $E < 0$)

Com que tractant-se d'una motocicleta no té sentit parlar de circular cap enrere, els quadrants que aquí es tenen en compte són el primer i el segon, tal i com s'ha dit a la selecció del controlador.

PRIMER QUADRANT

Així, mentre la moto circuli cap endavant i hagi de desenvolupar un parell ja sigui per accelerar o per mantenir la velocitat, la tensió d'entrada V es distribuirà entre la tensió induïda E (que depèn de la velocitat i a l'estar circulant cap endavant serà un terme positiu) i la I que al estar en una situació on es demanda parell també serà positiva.



SEGON QUADRANT

Al segon quadrant, en canvi la moto circula endavant però va reduint la velocitat voluntàriament (ja sigui no donant gas, o no donant gas i accionant els frens). En aquest cas, la tensió a l'entrada V es torna 0 ja que l'usuari no està accionant l'accelerador. No obstant, si la motocicleta es troba circulant a certa velocitat, el terme E , que depèn de la velocitat angular del motor, segueix sent positiu. Per igualar l'equació de malla a 0, per tant, necessàriament el terme $R \cdot I$ ha de ser negatiu. Al ser la R una constant pròpia del motor, el que succeeix en aquesta situació és que la intensitat I que circula pel motor es torna negativa. El motor, en aquest cas, està actuant com a generador. És en aquesta situació on el controlador ha de ser capaç d'activar l'estat de fre regeneratiu i començar a subministrar intensitat a les bateries, tenint en compte la intensitat màxima de càrrega que aquestes poden acceptar sense fer-se malbé, ja que en segons quin cas el motor enviarà una intensitat massa forta.

Notar que si la frenada no és voluntària, (en una situació, per exemple, on el motorista es trobi accelerant fortament en una pronunciada pujada anant a velocitats reduïdes) el que passarà és que al circular a velocitats baixes i estar subministrant molt voltatge a l'entrada, la intensitat que circularà pel motor serà molt elevada, buscant un parell que pugui vèncer la càrrega del moment. Com s'ha vist a l'apartat del motor, aquest té una intensitat de pic límit de 400 A però si se li proporciona aquest amperatge durant massa temps, tant el motor com les bateries podrien fer-se malbé. Naturalment, és responsabilitat del controlador (programable a plaer), evitar situacions de risc per a la motocicleta com aquesta limitant la tensió que se li pot subministrar a l'entrada del motor si detecta situacions de perill.

Així doncs, ens fixem amb les característiques de les bateries i del controlador per comprovar que no hi haurà problemes amb el fre regeneratiu.

4.3.5.1. Bateries (fre regeneratiu)

Les bateries es carreguen al 100% amb 6 hores de càrrega connectades a 10 A. No obstant, presenten una excel·lent capacitat de càrrega ràpida arribant al 80% en només mitja hora si es carreguen amb 100 A. Així doncs, es limitarà el corrent de tornada a les bateries a 115 A, ja que les bateries aguantaran els curts impulsos durant els períodes de frenada sense cap problema i així s'optimitzarà l'autonomia.

4.3.5.2. Controlador (fre regeneratiu)

Com ja s'ha dit a l'apartat corresponent, s'ha seleccionat un controlador apte per a gestionar la regeneració d'energia en condicions de frenada voluntària. Així, a la seva fitxa llegim "break switch is used to start regen" i "0-5 V break signal is used to command regen current". Fonamentalment, vol dir que s'hauran d'incorporar a la motocicleta manetes de frens amb un senzill circuit digital que envii un senyal al controlador cada cop que s'accionin els frens.

A més, també es pot configurar el controlador perquè limiti la intensitat que s'envia a les bateries en funció del voltatge que aquestes presentin (al següent apartat BMS es parla de la relació càrrega/voltatge de les bateries).



4.4. Components d'alimentació

Certament es podria considerar que les bateries són components d'alimentació, però com que també són un component bàsic per a un vehicle elèctric i la seva explicació havia de ser de les primeres per a traçar un camí amb continuïtat per l'anàlisi de components, ja s'han explicat anteriorment.

Així, el següent component d'alimentació que es tracta és el BMS.

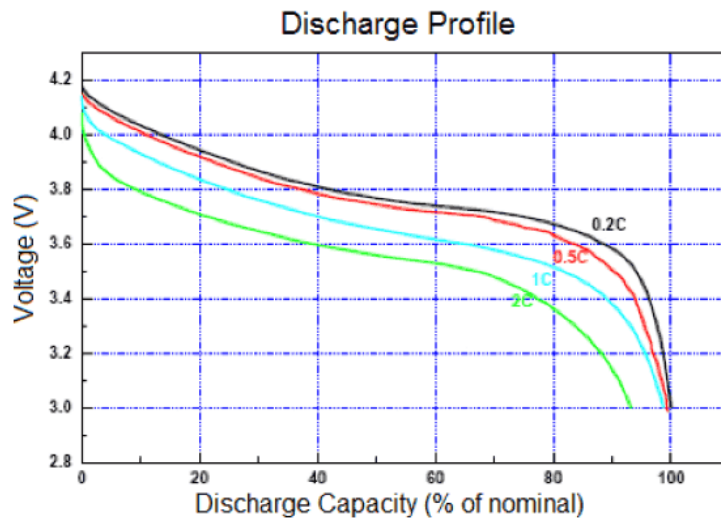
4.4.1. BMS

Un Battery Management System és un sistema electrònic que gestiona una bateria recarregable. La seva funció és protegir-la d'operar fora de la seva àrea d'operacions segura, monitoritzar el seu estat, calcular dades (tals com el seu nivell de càrrega, voltatge que proporciona, etc) i controlar el seu entorn i aprovar-lo o modificar-lo per garantir el correcte funcionament de la bateria .

- Computació: un BMS és capaç de calcular les següents dades:
 - Límit de corrent de càrrega (CCL)
 - Límit de corrent de descàrrega (DCL)
 - Energia lliurada des de l'última càrrega o cicle
 - Impedància interna d'una cel·la
 - Càrrega lliurada o emmagatzemada
 - Energia total lliurada des de la seva primera utilització
 - Temps de funcionament des del seu primer ús
 - Nombre de cicles fets
- Comunicació: un BMS és capaç de reportar tota la informació a un dispositiu extern, usant mitjans de comunicació com: Bus de dades CAN o DC, cablejat directe o comunicació sense fils.
- Protecció: ha de ser capaç de protegir la bateria d'operar fora de la seva àrea operativa segura, que inclou els següents casos:
 - Corrent massa alta (en càrrega i / o en descàrrega)
 - Voltatge massa alt (en càrrega)
 - Voltatge massa baix (en descàrrega, especialment important per a bateries de liti)
 - Temperatura massa alta o baixa
 - Pressió massa alta (només per a bateries de níquel)

El gràfic que a continuació es presenta representa el perfil de descàrrega per certes intensitats. Això és, el voltatge que ofereixen en funció del seu nivell de càrrega, per un cert amperatge de descàrrega.





Il·lustració 30: perfil de descàrrega genèric per a bateries li-ion. Font: <http://electronics.stackexchange.com/>.

Com es pot observar, com més carregada està la bateria més diferència de potencial ofereix entre els seus borns. Quan s'ha descrit el que era un BMS s'ha parlat de la seva zona d'operacions segura. Efectivament, les bateries de liti no poden permetre's carregar-se per sobre o descarregar-se per sota d'uns certs límits, doncs es fan malbé. La manera de saber el nivell de càrrega d'una bateria i evitar que creui aquests límits és precisament comprovant el voltatge que entreguen. Generalment, cal evitar que una bateria de liti es carregui per sobre dels 3.9 V i es descarregui per sota dels 2.9 V, essent el voltatge nominal de les bateries escollides, com s'ha vist, 3.7 V.

EVITANT LA DESCARREGA EXTREMA

Un BMS es un petit circuit electrònic que es connecta a cada una de les cel·les de la bateria i té com a objectiu principal aconseguir el correcte balanç^{xvii} d'aquesta. Les bateries formades per diverses cel·les, com és el cas que ens ocupa (24 cel·les connectades en sèrie), tenen un problema de balanç degut a la naturalesa de les cel·les. Això es, que en absolut tenen perquè estar totes les cel·les carregades a la mateixa capacitat. Fenòmens de l'entorn com la temperatura provoquen que unes es descarreguin més ràpidament que altres a una mateixa intensitat. El que fa un BMS es considerar que el voltatge de la bateria és el voltatge de la cel·la més baixa, és a dir el de la que està més descarregada. Aquesta informació s'envia al controlador que transmetrà a l'usuari l'estat de la bateria. En cas que el voltatge sigui perillosament baix per a la integritat de la/es cel·la/es en qüestió, el controlador escollit KDH12601E es pot configurar per mostrar una senyal de perill o fins hi tot per aturar el motor.

EVITANT LA SOBRECÀRREGA

En el cas que les bateries estiguin en procés de càrrega ja sigui connectades a la corrent o en situació de rebuda d'intensitat per fre regeneratiu, existeixen dos tipus de BMS que evitarien la sobrecàrrega de les cel·les:

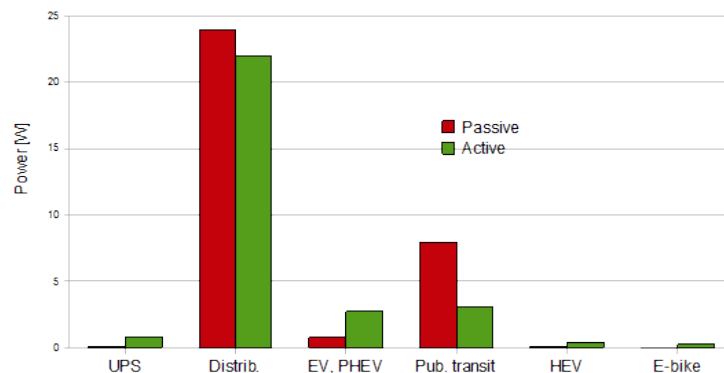
^{xvii} Es diu d'una bateria que està correctament balancejada quant totes les seves cel·les estan exactament a la mateixa capacitat de càrrega.



- BMS dissipatiu: els circuits BMS dissipatius incorporen una resistència a cada cel·la que s'activa quan es detecta que el voltatge de la cel·la està al límit superior. D'aquesta manera, l'energia es dissipa en forma de calor abans d'arribar a la cel·la i provocar una sobrecàrrega.
- BMS no dissipatiu: un BMS no dissipatiu inclou circuits electrònics molt més complexos que el que fan es redistribuir la intensitat que va cap a les cel·les que estan al 100% de càrrega cap a les que encara poden seguir carregant-se. Naturalment, és molt més car (unes 10 vegades més que un dissipatiu) i en el cas d'una motocicleta elèctrica augmentaria la seva eficiència energètica però en un grau tant petit que no val la pena invertir-hi.



Il·lustració 31: sistema de bateries connectades en sèrie amb BMS no dissipatiu.



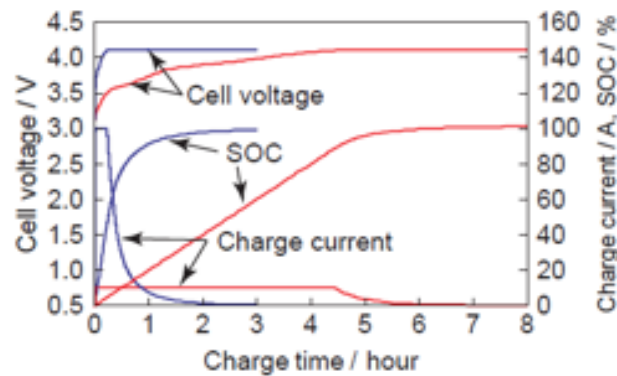
Il·lustració 32: BMS dissipatiu (vermell) vs no dissipatiu. Energia despesa en forma de calor per aplicació.

D'aquesta manera, es pot carregar el total de les cel·les al 100% sense fer malbé les que arribin al límit de càrrega abans. Un cop la última de les cel·les arribi al 100% de càrrega (normalment 3.9 V), i recordant que és el voltatge de la cel·la més descarregada el que es considera el voltatge de la bateria, el controlador procedirà a obrir el circuit de càrrega de les bateries mitjançant transistors.

4.4.2. Carregador

Les bateries escollides, les Lithium Energy Japan LEV50 de l'empresa GS YUASA, tenen el perfil de càrrega que representa el següent gràfic.





Il·lustració 33: perfil de càrrega d'una cel·la LEV50.

En vermell es presenten les línies d'intensitat de càrrega, voltatge de la cel·la i percentatge de càrrega en funció del temps per a una càrrega iniciada a 10 A. De color blau es veuen les mateixes representacions però per una càrrega iniciada a 100 A (càrrega ràpida).

Com es pot comprovar, carregant a 100 A durant 30 minuts s'arriba al 80% de la càrrega total, mentre que carregant a 10 A caldran 6 hores per arribar al 100%. Això ofereix la possibilitat de seleccionar dos carregadors; un que permeti la càrrega ràpida durant un període curt de temps i l'altre per a la càrrega nominal que s'utilitzaria per a realitzar càrregues completes que, en cas d'estar la bateria al mínim, durarien 6 hores. Cal tenir en compte que si s'abusa de carregar les bateries de liti amb intensitats massa elevades buscant la minimització del temps de càrrega, és molt probable que aquestes pateixin al llarg del temps una pèrdua de capacitat que afectaria directament a l'autonomia de la motocicleta. Cal anar, doncs, en compte amb aquest fet.



Il·lustració 34: exemple de carregador de bateries de liti. La placa de característiques marca (puntets vermells) que aquest és per a bateries de 15,8 V i carrega a 6 A d'intensitat.

4.4.2.1. Elecció del carregador

A més a més, tenint en compte que les bateries escollides connectades en sèrie ofereixen un increment de potencial de 88,8 V entre borns i, entenent que la potència del carregador serà igual a V (voltatge bateries) $\cdot I$ (intensitat de càrrega), es tenen aquests dos casos:

- Carregador necessari per a la càrrega a 100 A: $88,8 \text{ V} \cdot 100 \text{ A} = 8.880 \text{ W}$
- Carregador necessari per a la càrrega a 10 A: $88,8 \text{ V} \cdot 10 \text{ A} = 880 \text{ W}$



En el cas dels carregadors és important fixar-se que siguin explícitament fets pel voltatge de la bateria. Com que les bateries que s'han seleccionat connectades en sèrie tenen un increment de potencial entre borns força estrany (88.8 V), en aquest cas no serà fàcil trobar un model estàndard amb aquestes característiques. A més, el fet que la càrrega a 100 A requereixi d'un carregador amb uns 10.000 W de potència fa que aquesta opció quedi descartada directament.

Després de realitzar una intensiva cerca, s'ha trobat una empresa (AA Portable Power Corp) que ofereix carregadors personalitzats (<http://www.batteryspace.com/High-Wattage-Smart-Battery-Charger.aspx>).

Li-Ion/LiMnNi	14.8V (4S)	16.8V	50.0A , 100.0A
	25.9V (7S)	29.4V	35.0A , 50.0A
	37.0V (10S)	42.0V	20.0A , 40.0A
	48.1V(13S)	54.6V	18.0A , 30.0A , 80.0A , 150.0A
	51.8V(14S)	58.38V	18.0A , 30.0A , 80.0A , 150.0A
	59.2V(16S)	67.2V	15.0A , 25.0A , 60.0A , 120.0A
	74.0V (20S)	87.6V	13.6A , 20.0A , 52.0A , 95.0A
	77.7V (21S)	88.2V	13.5A , 20.0A , 48.0A , 92.0A
	81.4V (22S)	92.4V	12.9A , 20.0A , 48.0A , 88.0A
	85.1V (23S)	96.6V	12.0A , 20.0A , 44.0A , 82.0A
	88.8V (24S)	100.8V	11.9A , 20.0A , 42.0A , 78.0A
	92.5V (25S)	105.0V	10.0A , 20.0A , 38.0A , 72.0A
	96.2V (26S)	109.2V	9.0A , 20.0A , 35.0A , 70.0A
	155.4V(42S)	176.4V	6.0A , 10.0A , 27.0A , 55.0A
	310.8V(84S)	352.8V	3.0A , 5.0A , 14.0A , 27.0A

II-lustració 35: Llista disponible de carregadors personalitzats a [batteryspace.com](http://www.batteryspace.com).

Com es pot comprovar, hi ha una opció que carrega precisament bateries de 88.8 V (24 en sèrie). El voltatge al que treballarà aquest carregador serà de 100.8 V, proporcionant una intensitat de 11.9 A (una mica superior però molt propera als 10 A, cosa que no perjudicarà a les bateries). Concretament, tenint en compte que les cel·les tenen una capacitat de 50 Ah, si es carrega a 12 A trigarà 4 hores a carregar-se del tot, un temps força decent tenint en compte que es pot carregar tranquil·lament durant la nit, i dins de les especificacions límit.

Així doncs, serà qüestió d'encarregar aquest carregador especificant que la corrent subministrada serà la utilitzada a Europa, AC 230 V amb 50 Hz de freqüència, i que el voltatge i corrent de sortida seran 88,8 V i 12 A.



4.4.3. Cablejat

El recomanable és adquirir la longitud de cable justa i necessària per a la funció que exercirà el cable. Amb això s'evita que sobrin metres i es deteriori la qualitat del senyal, o que faltin metres i quedin tibants.

A més longitud, més resistència (oposició al pas del corrent). I contràriament, a menor longitud, menor resistència.

La secció màxima del cable és el diàmetre del cable, sense comptar l'aïllant. La secció o el gruix del cable es mesura excloent l'aïllament i determina la intensitat que és capaç de suportar el conductor. La secció, per tant, està subjecta al consum en amperes que circularà pel cable. Això comporta que si la secció és inferior a la necessària el cable es pot escalfar. Per això, sempre s'han d'utilitzar cables de secció suficient.

A major secció del cable (conductor més gruixut), menys resistència al pas del corrent.

El cablejat de la motocicleta s'elegirà, per tant, en funció de la intensitat de corrent que hi circularà. Així, els cables del sistema de propulsió elèctrica hauran de ser capaços de suportar els pics d'intensitat de 400 A, els cables del carregador els 12 A d'intensitat amb que s'ha decidit que es carregarien les bateries, i els cables del sistema auxiliar (llums, intermitents, etc) hauran de ser capaços de suportar la intensitat requerida per la potència dels components tenint en compte que funcionaran amb la xarxa de 12 V.

A continuació mostra una taula d'equivalències per al dimensionament de cables en funció de la intensitat que hi ha de passar. American Wire Gauge (AWG) és un sistema estandarditzat de dimensionament de cables utilitzat des de mitjans del segle XIX per a determinar el diàmetre dels cables conductors d'electricitat. La taula mostra les equivalències per a fils de coure, que són els que s'utilitzaran.

AWG	Diameter (mm)	Diameter (in)	Square (mm ²)	Resistance (ohm/1000m)	Current Load Ratings (amps) ¹⁾				
					Single Core	up to 3 cores	4 - 6 cores	Multicore 7 - 24 cores	25 - 42 cores 43 and above
40	0.08	-	0.0050	3420					
39	0.09	-	0.0064	2700					
38	0.10	0.0040	0.0078	2190					
37	0.11	0.0045	0.0095	1810					
36	0.13	0.005	0.013	1300					
35	0.14	0.0056	0.015	1120					
34	0.16	0.0063	0.020	844					
33	0.18	0.0071	0.026	676					
32	0.20	0.008	0.031	547					
30	0.25	0.01	0.049	351					
28	0.33	0.013	0.08	232.0					
27	0.36	0.014	0.096	178					
26	0.41	0.016	0.13	137					
25	0.45	0.018	0.16	108					
24	0.51	0.02	0.20	87.5	3.5	2	1.6	1.4	1.2
22	0.64	0.025	0.33	51.7	5.0	3	2.4	2.1	1.8
20	0.81	0.032	0.50	34.1	6.0	5	4	3.5	3
18	1.02	0.04	0.82	21.9	9.5	7	5.6	4.9	4.2
16	1.29	0.051	1.3	13.0	20	10	8	7	6
14	1.63	0.064	2.0	8.54	24	15	12	10.5	9
13	1.80	0.072	2.6	6.76					
12	2.05	0.081	3.3	5.4	34	20	16	14	12
10	2.59	0.10	5.26	3.4	52	30	24	21	18
8	3.25	0.13	8.30	2.2	75	40	32	28	24
6	4.115	0.17	13.30	1.5	95	55	44	38	33
4	5.189	0.20	21.15	0.8	120	70	56	49	42
3			26.65		154	80	64	56	48
2	6.543	0.26	33.62	0.5	170	95	76	66	57
1	7.348	0.29	42.41	0.4	180	110	88	77	66
0 (1/0)	8.252	0.33	53.49	0.31	200				
00 (2/0)	9.266	0.37	67.43	0.25	225				
000 (3/0)	10.40	0.41	85.01	0.2	275				
0000 (4/0)	11.684	0.46	107.22	0.16	325				
250					127				
300					152				
400					178				

Il·lustració 36: taula d'equivalències per a dimensionar cables.



4.4.3.1. Cablejat circuit principal (de tracció)

Per suportar 400 A, el cablejat haurà de tenir una secció de 178 mm² o, el que és el mateix, un diàmetre de 7.5 mm. Amb gaire bé un centímetre de diàmetre, es pot apreciar que el cable serà força gruixut si a més hi incorporem l'aïllant.

4.4.3.2. Cablejat del carregador

Els cables que vagin del carregador a les bateries hauran de suportar 12 A d'intensitat. S'elegeix per tant una secció d'1.3 mm² (1.29 mm de diàmetre).

4.4.3.3. Cablejat del circuit auxiliar

Per a determinar-lo, es suposa que la làmpada principal de la motocicleta (possiblement l'element amb més potència del circuit auxiliar) serà d'uns 50 W de potència. En una xarxa de 12 V, això significa que el cable haurà de portar uns 5 A d'intensitat. En conseqüència es fixa una secció de 0.33 mm² (0.64 mm de diàmetre). Es pot veure que són cables realment prims els que alimentaran el circuit auxiliar, però només cal pensar en el filament d'una bombeta per comprovar que efectivament el cablejat per alimentar-la no destacarà pel seu gruix.

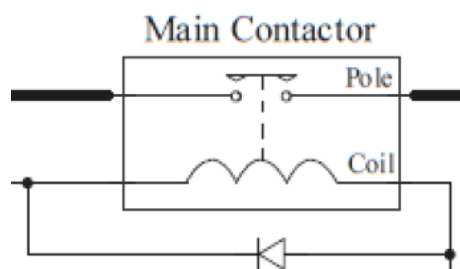
Cal dir que un cop muntat un primer prototip amb aquests cablejats, caldria monitoritzar la temperatura dels cables per a decidir si tenen suficient secció o es sobre-escalfarien massa. Especialment el cablejat del circuit principal, la secció del qual és potser una mica justa. De totes formes, es decideix aquest diàmetre tenint en compte que com més àrea tenen els cables, més rígids són i per tant més difícil és el seu muntatge.

4.4.4. *Contactor general*

Un contactor és un component electromecànic que té per objectiu establir o interrompre el pas del corrent d'un circuit. Un contactor és un dispositiu amb la capacitat de tallar el pas del corrent elèctric d'una instal·lació, de ser accionat a distància i que té dues posicions de funcionament: una estable o de repòs, quan no rep cap acció per part del circuit de comandament, i l'altre inestable, quan si que actua dita acció. Quan es parla de comandament es parla, en aquest cas, del controlador.

Tot i que sembli un dispositiu semblant a un relé, no és exactament el mateix. La diferència principal radica en que tot hi que ambdós permeten de forma manual o automàtica el control del pas del corrent per tota classe de circuits, els relés tenen la missió de controlar corrents de baix valor. Els contactors, en canvi, utilitzen interruptors electromagnètics per a la connexió i desconexió de, per exemple, circuits molt potents d'il·luminació o força motriu d'elevada tensió i potència. És, per tant, el component indicat per a exercir aquesta funció a la motocicleta.





Il·lustració 37: esquema elèctric d'un contactor. Font: Kelly Components

Com es pot veure a la imatge, el contactor disposa fonamentalment del contacte principal (circuit al que pot facilitar o impedir el pas del corrent) i d'un circuit auxiliar amb una bobina. El díode representat a la figura és un díode de seguretat que serveix per a dissipar el corrent elèctric residual de qualsevol circuit quan aquest obra instantàniament el pas del corrent.

4.4.4.1. Elecció del contactor

La casa fabricant de contactors més coneguda es diu Albright. Per a triar un contactor s'ha de comprovar que la intensitat de pic, la intensitat nominal i l'increment de potencial s'ajustin a les seves característiques perquè no es vegi malmès. El candidat escollit és l'**Albright SW200**.

Característica	Valor
Circuit Principal	
Corrent nominal	400 A
Corrent de pic	600 A
Voltatge en borns	250 V (DC)
Circuit Auxiliar	
Corrent nominal	5 A



Il·lustració 38: contactor Albright SW200.

4.5. Components auxiliars

Els components auxiliars de la motocicleta seran els següents:

- Convertidor DC-DC
- Llums de davant (curta i llarga)
- Intermitents (davant i darrera)



- Llum de posició posterior
- Llum de fre
- Clàxon
- Pantalla LED amb informació de l'estat del vehicle (velocitat, càrrega de les bateries, compta kilòmetres (total i de tram), rellotge.
- Sortida de 12 V

Aquests formaran part del circuit auxiliar de la motocicleta, amb tensió 12 V, que ja està representat a l'esquema de conjunt.

No es realitzarà la tria ni la connexió conceptual d'aquests components exceptuant el convertidor, ja que no forma part de l'abast del projecte, que es centra en el sistema elèctric de tracció de la motocicleta.

4.5.1. *Convertidor*

La conversió dins de l'àmbit de l'enginyeria elèctrica és la conversió d'un tipus d'energia elèctrica d'una forma a una altre. Els sistemes de conversió de potència incorporen regulació del voltatge per a controlar-lo dins de certs límits.

El tipus de convertidor que s'hauria d'utilitzar en un accionament electromecànic dependrà de la màquina elèctrica que s'utilitzi, del tipus de font disponible i de les prestacions que especifiqui l'usuari.

Les principals àrees dels convertidors són presentades a continuació amb una petita explicació de cadascun dels tipus:

- Convertidor DC-DC: son els anomenats trossejadors o "choppers" que utilitzen tècniques de modulació lineals o tècniques de modulació del gruix de pols (PWM).
- Convertidor AC-DC: la utilització de díodes i transistors com a commutadors està àmpliament estesa. No només en el control de motors de corrent contínua amb o sense escombretes, sinó en el desenvolupament dels convertidors de freqüència.
- Convertidors DC-AC: és una de les més importants, doncs tant els convertidors de freqüència amb font de tensió com amb font de corrent estan dins aquest camp.
- Convertidors AC-AC: aquí es poden trobar tant els invents més antics com els cicle-convertidors fins als més innovadors com les matrius convertidores o els convertidors d'enllaç directe de tensió o corrent.

En aquest cas, interessa un convertidor DC-DC, doncs tant l'energia proporcionada per les bateries com la utilitzada pel motor DC és corrent contínua. Cal tenir en compte que per a carregar les bateries s'haurà de convertir electricitat de AC a DC, però aquesta operació la realitzarà el carregador de bateries que s'adquirirà més endavant.

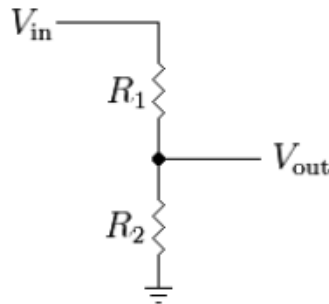
4.5.1.1. **Convertidor DC-DC**

Els convertidors DC-DC són els utilitzats per alimentar màquines de corrent contínua a partir de fonts d'energia de tensió contínua.



CONVERTIDORS LINEALS

Els convertidors lineals són els més simples dels convertidors, ja que únicament es tracta d'un divisor de tensió. L'alimentació d'entrada és la tensió inicial V_{in} i la tensió de sortida deguda al divisor V_{out} .



Il·lustració 39: divisor de tensió simple.

Aquest tipus de conversió, però, té forces desavantatges:

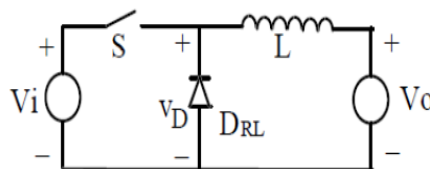
- S'ha de conèixer la magnitud de la càrrega per a dimensionar les dues resistències.
- És impossible generar tensions més elevades que les de la font d'alimentació (no seria un problema en el nostre cas).

CONVERTIDORS ESTÀTICS

Són convertidors electrònics de tensió, també se'ls anomena trossejadors o "choppers". Els convertidors commutats en alta freqüència (normalment de 100 kHz a 5 MHz) són circuits de potència on els semiconductors commuten a una freqüència molt més gran que la de variació de les formes d'ona d'entrada i sortida del convertidor. Això, permet aplicar filtres passa-baix per a eliminar tots els components harmònics no desitjats. Els convertidors DC-DC formen part d'aquest grup de convertidors, i aquest mètode de conversió és més eficient que la dels convertidors lineals. El seu principal inconvenient és el soroll que generen al treballar a altes freqüències, el que farà que aquest soroll pugui interferir amb altres dispositius electrònics si no es filtra convenientment.

Així, s'hi poden trobar diferents configuracions:

- Buck:

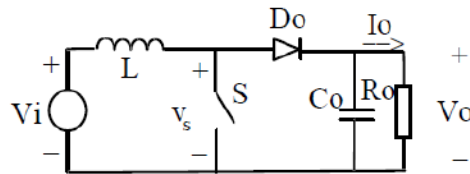


Il·lustració 40: circuit equivalent d'un convertidor Buck.

En aquest convertidor sempre es compleix que l'entrada V_i és major que la sortida V_o . És per això que també se l'anomena reductor. L'interruptor S commuta a una freqüència $f = 1 / T$.



- Boost:



Il·lustració 41: circuit equivalent d'un convertidor Boost.

En aquest convertidor sempre es compleix que, contràriament al de tipus Buck, la tensió d'entrada V_i és menor que la de sortida V_o , per això és altrament conegut com elevador.

4.5.1.2. Necessitat i tria de model

En el cas de la motocicleta elèctrica, es necessita un convertidor de tensió que passi els 88,8 V subministrats per les bateries als 12 V amb els que funcionaran els components auxiliars tals com llums, intermitents, una sortida de 12 V o el controlador mateix. Així, es requereix un controlador tipus Buck o reductor.

KELLY HWZ Series DC/DC Converter 96 V to 12 V



Il·lustració 42: convertidor KELLY HWZ Series DC/DC Converter 96 V to 12 V.

Novament, l'empresa Kelly Controls disposa d'un producte que servirà per a la motocicleta de la qual s'està dissenyant el sistema elèctric. A continuació es mostren les principals característiques que afecten a la seva elecció (rang de treball, etcètera). La fitxa completa amb les dimensions i demés informació, es troba a l'annex.

Voltatge entrada	Voltatge sortida	Corrent sortida	Rang de treball	Rang temperat.
DC 96 V	DC 12 V	25 A	75 – 130 V	-10°C - +40°C

4.6. Simulació dinàmica

Amb els components essencials escollits (notar que naturalment faltaria triar el model de cada fusible, cada díode de seguretat, etc) es pot procedir a la simulació del comportament dinàmic que tindrà la motocicleta. L'objectiu d'aquest apartat és obtenir una taula amb les especificacions finals d'un



Per a realitzar la simulació és necessari entendre, mitjançant les fórmules adients, quin és el recorregut que fa l'energia pel sistema.

[illegible]

L'energia bàsicament sortirà de les bateries en forma de corrent elèctric, serà administrada pel controlador en funció de les ordres de l'usuari i enviada al motor, que finalment la convertirà en mecànica i transferirà a la roda.

La simulació es realitzarà amb el programa Microsoft Excel, on cada línia del full de càlcul serà una fracció de temps i cada columna un terme del model.

4.6.1.1. Termes elèctrics

El voltatge de les bateries es fixa a 88.8 V. El voltatge amb el que es treballarà a la simulació, el que rebrà el motor, seguirà la següent equació:

$$0 \leq comandament \leq 1$$



El comandament representa la quantitat de potència que l'usuari està demanant a la motocicleta mitjançant l'accelerador. En una simple representació de l'operació de PWM que el controlador desenvolupa, es fixa el resultat d'aquesta operació multiplicant el voltatge de les bateries pel factor comandament, aconseguint així tot el rang de valors de 0 a V_{bateries} .

També s'hi afegeix una columna amb el factor comandament de fre (també amb valors d'entre 0 i 1), per simular quan sigui necessari una frenada.

INTENSITAT [A]

En aquest cas es parteix de l'equació de malla del motor DC per a aïllar la intensitat de la següent forma:

$$V_{\text{motor}} = E + R \cdot I$$

$$V_{\text{motor}} = K_e \cdot \omega_{\text{motor}} + R \cdot I$$

$$I = \frac{V_{\text{motor}} - K_e \cdot \omega_{\text{motor}}}{R}$$

Les constants K_e i R són fixes del motor, mentre que ω_{motor} serà una altre columna del full de càlcul.

Cal destacar que a la columna de la intensitat se li restringeix mitjançant funcions del software Excel, que el seu valor sigui superior a 400 A o inferior a -115 A, simulant així les actuacions del controlador amb la missió d'evitar que motor i bateries es deteriorin.

PARELL MOTOR [Nm]

Es recorda la fórmula del parell motor, que és la següent:

$$\tau = K_t \cdot (I_r - I_0)$$

En aquest cas, tant K_t com I_0 són constants del motor, mentre que I_r és la intensitat que circula pel motor (terme calculat immediatament abans que aquest).

També cal evitar que el terme parell motor caigui a valors per sota el 0, ja que en aquest cas no tindria sentit. Per a fer-ho, es fixa el seu valor a 0 sempre que la intensitat del rotor sigui inferior (positiva o negativa) a la intensitat per a vèncer les resistències internes del motor I_0 .

4.6.1.2. Balanç de potències

POTÈNCIA ELÈCTRICA [kW]

La potència elèctrica subministrada al motor serà:

$$P_{\text{elec}} = \frac{V_{\text{real}} \cdot I}{1000}$$

Senzillament el producte del voltatge real subministrat al motor per la intensitat que hi circularà en aquell moment. Es divideix per 1000 per a canviar-ho d'unitat de W a kW.

Què és el terme V_{real} ?



El cas és que el voltatge subministrat al motor serà certament el voltatge de les bateries multiplicat pel comandament que se li estigui donant. Però cal tenir en compte, que si la intensitat està essent acotada pel controlador, la equació de malla no es complirà.

Recordant que $V = E + I \cdot R$, i sabent que la E ve donada per la velocitat angular del motor, en el moment en que la intensitat intenta agafar valors massa elevats i el controlador li limita la que li subministra, passa que $V \neq E + I \cdot R$. O, el que és el mateix, $V \neq V_{real}$.

El valor V_{real} és el que s'ha d'utilitzar per al càlcul de la potència elèctrica, ja que és el que realment està utilitzant el motor. Es crea, per tant, una columna V_{real} al costat de la V .

POTÈNCIA DISSIPADA [kW]

La potència dissipada en forma de calor és igual al producte del quadrat de la intensitat que hi circula per la resistència que ofereix el motor, com segueix:

$$P_{dissipada} = \frac{I^2 \cdot R}{1000}$$

També es multiplica per 0.001 per a canviar-ho a kW.

POTÈNCIA MECÀNICA [kW]

La potència mecànica és la potència elèctrica que realment aprofita el motor per a moure l'eix. També es podria calcular mitjançant la eficiència del motor, però com que només es dada en certes condicions és molt millor fer-ho així, calculant-ho per cada fracció de temps:

$$P_{mec} = \frac{\tau \cdot \omega_{motor}}{1000}$$

En aquest cas, la potència mecànica és igual al producte del parell del motor per la velocitat de l'eix.

BALANÇ DE POTÈNCIES [kW]

Finalment es fa un balanç de potències i es comprova que durant tota la simulació aquest sigui 0 o tingui valors molt propers al 0:

$$P_{elec} - P_{diss} - P_{mec} = 0$$

4.6.1.3. Termes dinàmics

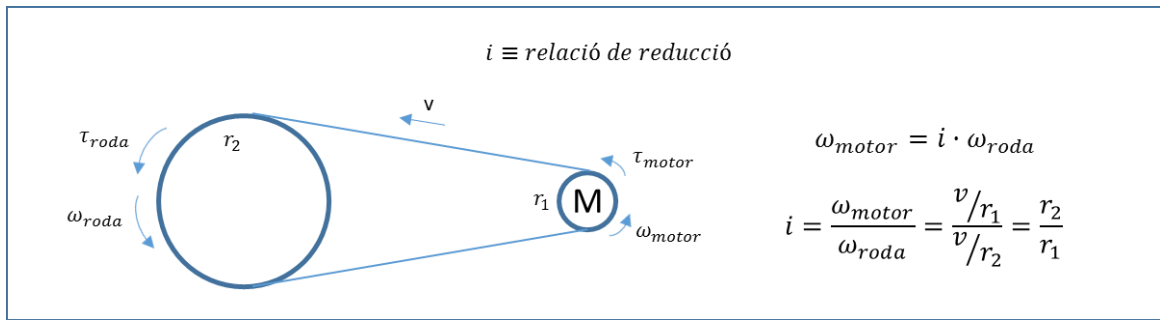
A continuació es procedeix a definir els termes dinàmics de la simulació, és a dir les forces que la motocicleta ha de vèncer amb la força que el motor li transmet i els treballs que aquestes realitzen.

ANÀLISI DINÀMIC DEL SISTEMA MOTOCICLETA

Per a calcular la força que exerceix la motocicleta és necessari introduir el concepte *relació de reducció* (i). Aquesta és la relació entre el pinyó (engranatge amb el que l'eix del motor té una relació directa) i la corona (engranatge solidari a la roda de la motocicleta).

Aquesta relació és el primer factor que es podrà modificar a voluntat (dins de certs límits) per intentar que la motocicleta tingui les prestacions adequades.



Il·lustració 44: representació i càlcul de la relació de reducció i .

Com es distingeix a la imatge, el pinyó té radi r_1 i la corona radi r_2 . La relació entre les seves velocitats angulars serà:

$$\omega_{pinyó} = i \cdot \omega_{corona}$$

On cal dir que, com que el motor és solidari al pinyó i la corona solidària a la roda, es pot aplicar que:

$$\omega_{motor} = i \cdot \omega_{roda}$$

Entenent que la velocitat angular és igual a la velocitat lineal de qualsevol punt de la cadena representada a la figura, dividida entre el radi en qüestió, també es podria escriure la relació així:

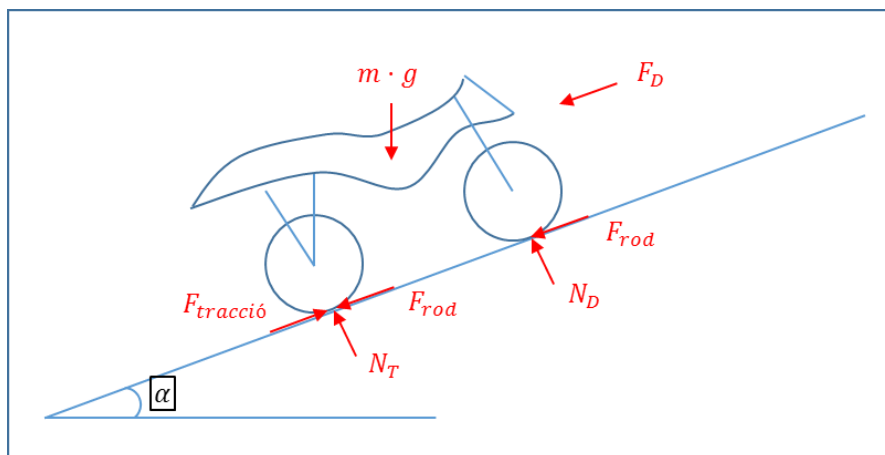
$$\frac{v_{cadena}}{r_1} = i \cdot \frac{v_{cadena}}{r_2}$$

D'aquesta manera, la i queda definida de forma que:

$$i = \frac{\omega_{motor}}{\omega_{roda}} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{\# \text{ dents corona}}{\# \text{ dents pinyó}}$$

Notar que la relació podria ser inversa si s'hagués plantejat la primera equació amb la i en producte amb l'altre terme.

Un cop ha quedat definit el terme i es procedeix a fer un diagrama del sistema motocicleta i les forces que hi intervenen.



Il·lustració 45: diagrama dinàmic del sistema motocicleta.

Com es pot veure, la motocicleta està afectada principalment per les següents forces:



- F_D : Força aerodinàmica (en contra del moviment)

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot s \cdot C_D \cdot v^2$$

La força aerodinàmica es calcula mitjançant la fórmula anterior, on ρ_{aire} és la densitat de l'aire (1.2 Kg/m^3), s la superfície frontal de contacte amb l'aire i C_D el coeficient aerodinàmic de penetració de la superfície (drag coefficient on frontal area) en anglès. Com que en aquest cas no se sap l'àrea frontal de la motocicleta ni el seu coeficient, ja que les plaques de la carrosseria no formen part de l'abast del projecte, s'ha buscat una aproximació en motocicletes de similars característiques.

S'ha vist que en el món de l'aerodinàmica en motocicletes, els termes s i C_D es tracten tot sovint conjuntament, tabulant els seus valors per diferents tipus de motocicleta i la posició del conductor.

Machine and rider	Drag coeff. on frontal area, C_D	Frontal area		CpA m^2	Power to overcome air drag at 10m/s (22mi/h) watts	Power to overcome rolling resistance AT 10m/s for specified total mass, kg, and C_R value		
	C_D	m^2	ft^2		watts	kg.	C_R	watts
Upright commuting bike	1.15	0.55	5.92	0.632	345	90	0.0060	53
Road bike, touring position	1.00	0.40	4.3	0.40	220	95	0.0045	38
Racing bike, rider crouched, tight clothing	0.88	0.36	3.9	0.32	176	81	0.0030	24
Road bike+ Zipper fairing	0.52	0.55	5.92	0.29	157	85	0.0045	38
Road bike+ pneumatic Aeroshell+bottom skirt	0.21	0.68	7.32	0.14	78.5	90	0.0045	40
Unfaired LWB recumbent (Tour Easy)	0.77	0.35	3.8	0.27	148	90	0.0045	40
Faired LWB recumbent (Avatar Blubell)	0.12	0.48	5.0	0.056	30.8	95	0.0045	42
Vector faired recumbent tricycle, single	0.11	0.42	4.56	0.047	25.8	105	0.0045	46
Road bike in Kyle fairing	0.10	0.71	7.64	0.071	39.0	90	0.0045	40
"M5" faired low racer	0.13	0.35	3.77	0.044	24.2	90	0.003	26
"Flux" SWB, rear fairing	0.55	0.35	3.77	0.194	107	90	0.004	35
Moser bicycle	0.51	0.42	4.52	0.214	118	80	0.003	24
Radius "Peer Gynt" unfaired	0.74	0.56	6.03	0.415	228	90	0.0045	40
"Peer Gynt" + front fairing	0.75	0.58	6.24	0.436	240	93	0.0045	41
ATB (mountain bike)	0.69	0.57	6.14	0.391	215	85	0.0060	50

II·lustració 46: dades aerodinàmiques en funció del tipus de motocicleta. Font: www.motorpasionmoto.com.

En aquest cas, s'assigna a la motocicleta un valor de $s \cdot C_D = C_D A = 0.6 \text{ m}^2$.

Per últim, el terme que falta és v^2 el qual és la velocitat de la motocicleta en aquell instant elevat al quadrat. Aquest terme també serà tractat en una columna de la simulació.

- F_{rod} : Força de rodadura (en contra del moviment) [N]

$$F_{rod} = (N_t + N_d) \cdot C_r = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot C_r$$

La força de rodadura és la força d'impediment a l'avanç que el contacte dels pneumàtics crea amb el terra. Factors com el material dels pneumàtics, el seu desgast, el seu nivell de pressions o el terreny pel qual es circula afecten a la constant C_r (constant de rodadura). Aquesta també està tabulada i en aquest cas s'ha triat un coeficient $C_r = 0.01$.



C_{rr}	μ_r	Descripción
0,0002 a 0,0010 ^{1,2}	0,5 mm	Ruedas de ferrocarril sobre railes de acero
	0,1 mm	Rodamientos de bolas en acero sobre acero
0,0025 ³		Neumáticos especiales Michelin para automóvil solar/eco-marathon
0,005		Railes estándar de tranvía
0,0055		Neumáticos BMX de bicicleta usados para automóviles solares ³
0,006 a 0,01		Neumáticos de automóvil de baja resistencia y neumáticos de camión sobre carretera lisa
0,010 a 0,015 ⁴		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre losas de piedra
0,020		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hormigón
0,030 a 0,035		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre alquitrán o asfalto
0,055 a 0,065		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hierba, barro y arena
0,3 ⁴		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hierba, barro y arena

Il·lustració 47: taula de coeficients C_r .

- F_{grav} : Força de la gravetat (a descompondre) [N]

En aquest cas es considera només el factor de la força que va en contra (o a favor) del sentit del moviment. Així, quedaria:

$$F_{grav} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

- F_{tracc} : Força de tracció (a favor del moviment) [N]

Per a determinar la força de tracció i l'equació que regirà l'acceleració de la motocicleta, es planteja el balanç d'energies d'aquesta. Posteriorment es deriva el que s'obtingui i s'igual a al balanç de potències, els termes del qual es poden escriure com el producte de la força per la velocitat o del parell per la velocitat angular, segons apliqui.

$$\begin{aligned}
 E_c &= \frac{1}{2} \cdot m_{moto} \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot I_{roda\ t} \cdot \omega_{rt}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_{roda\ d} \cdot \omega_{rd}^2 = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot m_{moto} \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot I_{roda\ t} \cdot \left(\frac{v}{r_t}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot I_{roda\ d} \cdot \left(\frac{v}{r_d}\right)^2 = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \left[m_{moto} + I_{rt} \cdot \frac{1}{r_t^2} + I_{rd} \cdot \frac{1}{r_d^2} \right] \cdot v^2 = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot [m_{moto} + m_{rt} + m_{rd}] \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot m'' \cdot v^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{E}_c &= \left(\frac{1}{2} \cdot m'' \cdot v^2 \right) \frac{d}{dt} = P_{mot} + P_{fricc} + P_{aero} + P_{pes} = \\
 m'' \cdot v \cdot a &= \omega_M \cdot \tau_M - F_{rod} \cdot v - F_D \cdot v - m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v = \\
 m'' \cdot \varphi \cdot a &= \varphi \cdot \frac{i}{r_t} \cdot \tau_M - F_{rod} \cdot \varphi - F_D \cdot \varphi - m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \varphi
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{1}{m''} \cdot \left[\tau_M \cdot \frac{i}{r_t} - m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot C_r - F_D - m \cdot g \cdot \sin \alpha \right]$$

Així, s'obté l'equació de l'acceleració. A la banda on hi surten les forces s'hi poden distingir les tres forces descrites anteriorment. L'únic terme que va sumant és, doncs, la força de tracció de la motocicleta.



$$F_{tracc}[N] = \tau_{motor} \cdot \frac{i}{r_{roda t}}$$

Tots aquests termes seran columnes a la simulació que s'aniran actualitzant a cada fila en funció de les variables de qui depenguin.

Per últim, s'hi incorpora el terme *Força de frenada* per tal de poder simular frenades. Aquest anirà multiplicat pel *comandament de frenada* que, com s'ha dit, podrà prendre valors d'entre 0 i 1 per tal de poder simular frenades de diferent intensitat.

Com que la força de frenada dependrà del sistema de frenada en si, el que es fa és fixar que la frenada de màxima intensitat serà de 0.8 G's (0.8 vegades la força de la gravetat). Aquest és un valor realista en quant a frenades de scooters, i per tant la fórmula quedarà:

$$F_{frenada}[N] = \text{comandament frenada} \cdot m_{moto} \cdot 0,8 \cdot 9,81$$

Per últim, per a calcular el treball que realitzen totes aquestes forces a cada instant, es crea una columna per a cada una de les forces on es multiplica el valor instantani de la força per la velocitat que la motocicleta porta en aquell moment.

4.6.1.4. Termes cinemàtics

I s'entra per fi als termes cinemàtics de la simulació, els que donaran informació de l'acceleració i velocitat de la motocicleta i del motor.

ACCELERACIÓ DE LA MOTOCICLETA [m/s²]

L'equació de l'acceleració es pot veure al final de la il·lustració 17, i és aquesta:

$$a_{moto} = \frac{F_{tracc} - F_{frenada} - F_{rodad} - F_{aero} - F_{grav}}{m''}$$

On el càlcul de la m'' es mostra també a la il·lustració. Aquesta massa representa la massa total de la motocicleta i el pilot, tenint en compte les inèrcies de les dues rodes i del motor.

VELOCITAT MOTOCICLETA [m/s] i [km/h]

Aquest és un terme molt important ja que, a banda del seu obvi significat, és el terme encarregat de relacionar les files de la simulació. En altres paraules, la velocitat a l'instant i es calcularà amb l'acceleració de l'instant immediatament anterior $i-1$. La fórmula que s'utilitza per al seu càlcul és la que segueix:

$$v_i = v_{i-1} + a_i \cdot 0,1$$

El terme acceleració va multiplicat per l'increment de temps que, com s'ha dit, són 0.1 segons.

VELOCITAT ANGULAR DE LA RODA [rad/s]

La velocitat angular de la roda és igual a la velocitat de la motocicleta partit pel radi de la roda:

$$\omega_{i roda} = \frac{v_i}{r_{roda}}$$



VELOCITAT ANGULAR MOTOR [rad/s] i [rpm]

Per acabar, la velocitat angular del motor es calcula mitjançant la relació de reducció com:

$$\omega_{i\ motor} = \omega_{i\ roda} \cdot i$$

4.6.1.5. Què no té en compte la simulació?

Aquesta simulació considera les pèrdues al motor, que seran sens dubte les més pronunciades, però no considera pèrdues per efecte Joule al cablejat, a les bateries (pèrdues òhmiques i de potència), al controlador ni a la resta de components que no s'han considerat i pels que de ben segur s'escaparà energia en forma de calor. A més, també falta considerar la despesa energètica produïda pels components del sistema auxiliar.

De totes formes, s'estima que l'energia consumida en aquests conceptes serà com a màxim d'un 5% del total, i afectaria de forma directe als càlculs de l'autonomia però gaire bé gens a la resta de simulacions.



4.6.2. Proves dinàmiques

Amb el full de càlcul preparat, es procedeix a fer diferents tipus de proves dinàmiques per a aconseguir les prestacions òptimes fixant correctament la relació de reducció i . Així, les constants que són fixades en la simulació ja sigui perquè venen donades pel motor o perquè s'han anat decidint o aproximant durant el treball, són:

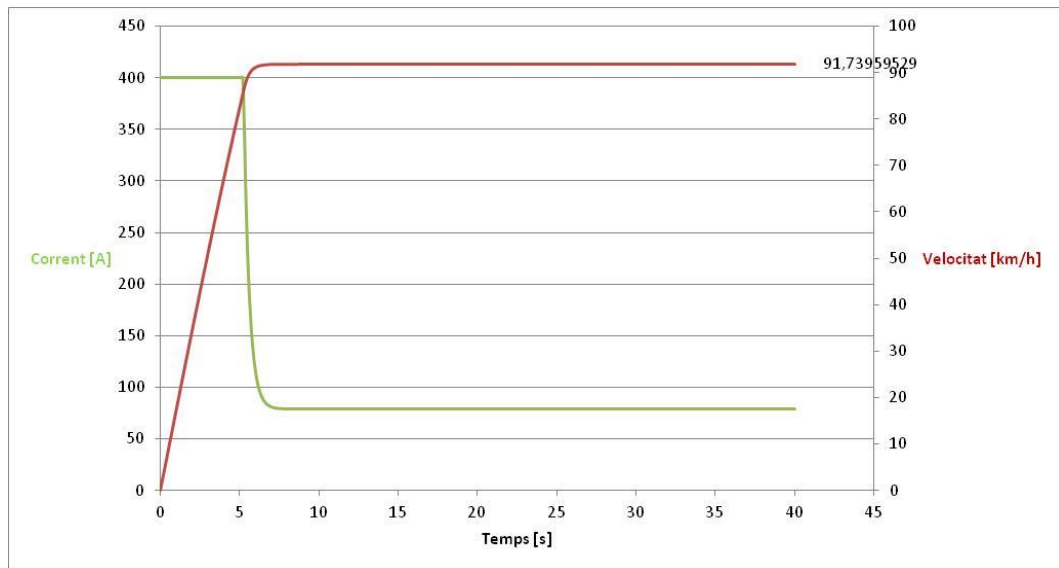
Constants elèctriques		
Vbat	88,8	V
Kt	0,17	N·m/A
Ke	0,02	V/rpm
Ke	0,17	(s·V)/rad
R	0,0175	Ohm
Io	4	A
I _{max}	400	A
I _{min}	-115	A
Constants mecàniques		
Rrt	0,2478	m
Rrd	0,2605	m
i	4	-
Ird	0,67098	kg·m ²
Irt	0,491753	kg·m ²
Im	0,0236	kg·m ²
Δt	0,1	s
mmoto+pilot	250	Kg
Cr	0,01	-
m''	274,0454012	Kg
CdA	0,6	-
densitat aire	1,2	Kg/m ³
α inclinació	0	rad

4.6.2.1. Acceleració màxima fins a velocitat punta

Com es pot veure, la relació de reducció i ha sigut finalment fixada a 4. No obstant, inicialment es va proposar un valor de 5. Seguidament es mostra el resultat de la primera prova per aquests dos valors de i .

En una simulació d'acceleració màxima, es fixa l'angle α a 0 representant una superfície sense inclinació i el comandament d'acceleració a 1 durant tota la simulació (totes les línies del full de càlcul), entenent per tant que la situació seria que el pilot accelera sempre al màxim.



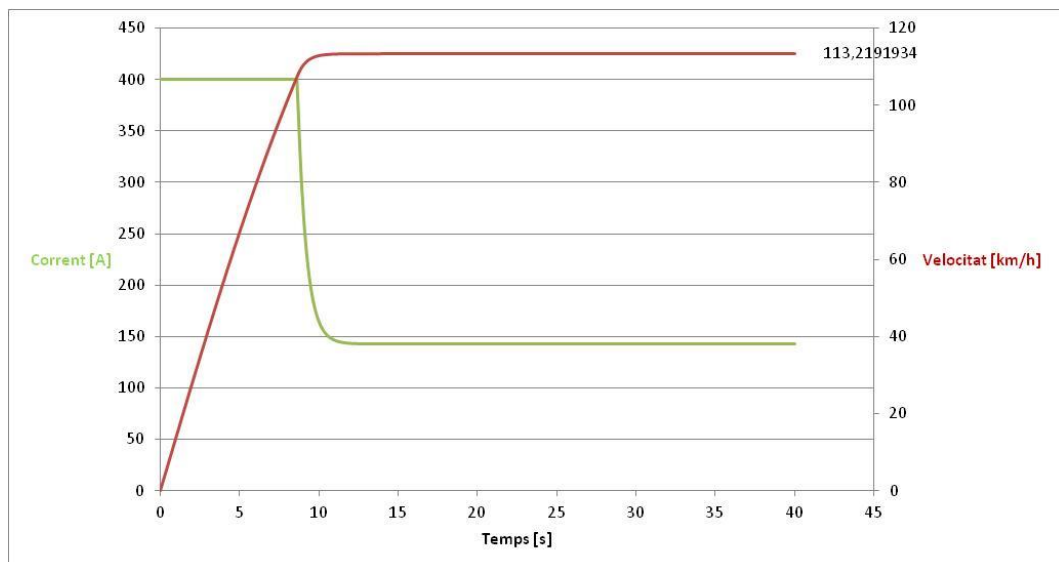


Il·lustració 48: el gràfic mostra els valors de la intensitat i la velocitat en funció del temps en una situació d'acceleració màxima en pla fins a velocitat punta. $\alpha = 0$, $i = 5$.

En aquest cas es pot comprovar com el motor sol·licita els 400 A fixats com a corrent màxim pel controlador fins gairebé arribar a la velocitat màxima (91 km/h). Està, per tant, uns 6 segons funcionant amb corrent de pic i per tant això no afectaria negativament al motor ni a les bateries.

No obstant, la velocitat punta està per sota el límit de 100 km/h que es va imposar durant la definició de les especificacions. Així doncs, decideix canviar-se la relació de reducció i .

Al cap d'un meticulós procés de tanteig i comprovant que totes les especificacions es puguin complir, s'acaba fixant el terme i a 4, quedant aquesta primera prova com segueix.



Il·lustració 49: acceleració màxima en pla fins a velocitat punta. $\alpha = 0$, $i = 4$.

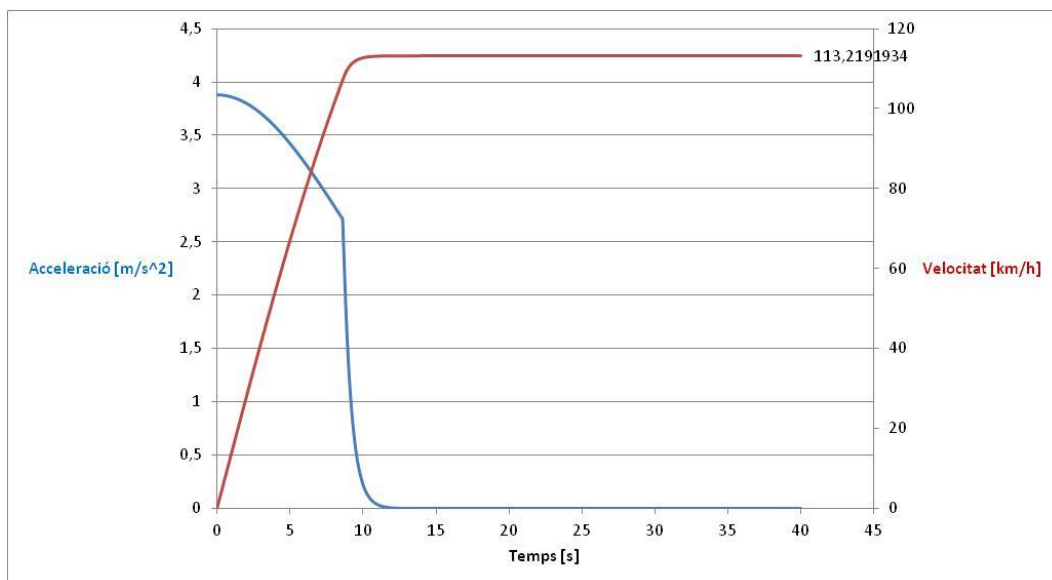
En aquest cas la intensitat del corrent de pic es fa durar més estona, però al estar per sota dels 10 segons segueix essent respectuós amb el motor i les bateries. Com diu el fabricant del motor, aquest



pot estar treballant amb la intensitat de pic fins a 10 segons sense patir, mentre que les bateries admetien una intensitat de descàrrega per impuls de 10 vegades la seva capacitat (50 Ah) [A], és a dir 500 A.

A més, amb aquest terme $i = 4$ s'obté una velocitat punta de 113 km/h, una mica per sota els 120 km/h objectiu però sobradament per sobre dels 100 km/h límit.

En quant a acceleracions, s'arriba a 50 km/h en 3.7 segons i a 100 km/h en 7.9 segons, complint també les especificacions desitjades.

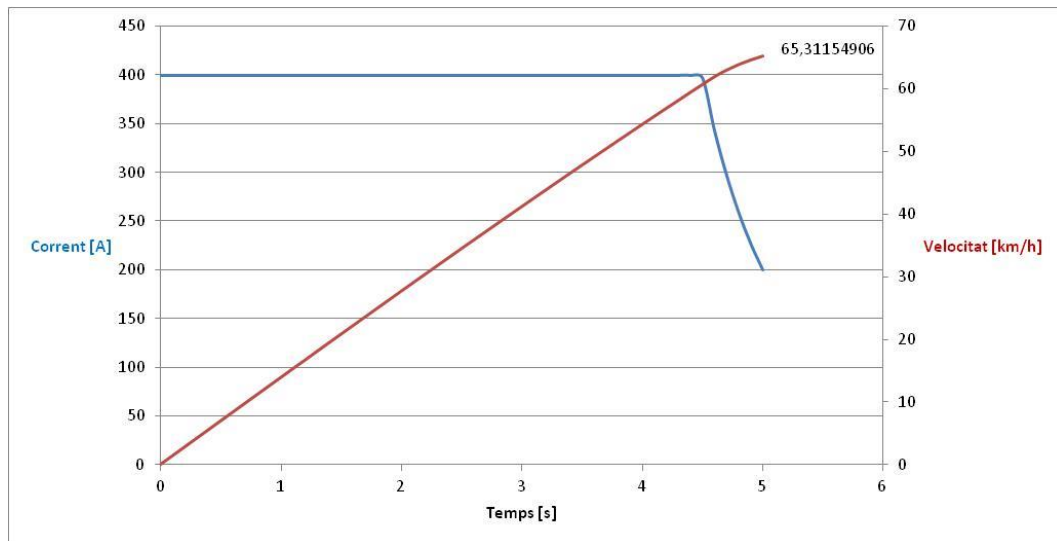


Il·lustració 50: aquest gràfic mostra la evolució de l'acceleració de la motocicleta en condicions d'acceleració màxima en pla fins a velocitat punta. $\alpha = 0$, $i = 4$.

4.6.2.2. Acceleració 60% durant 5 segons

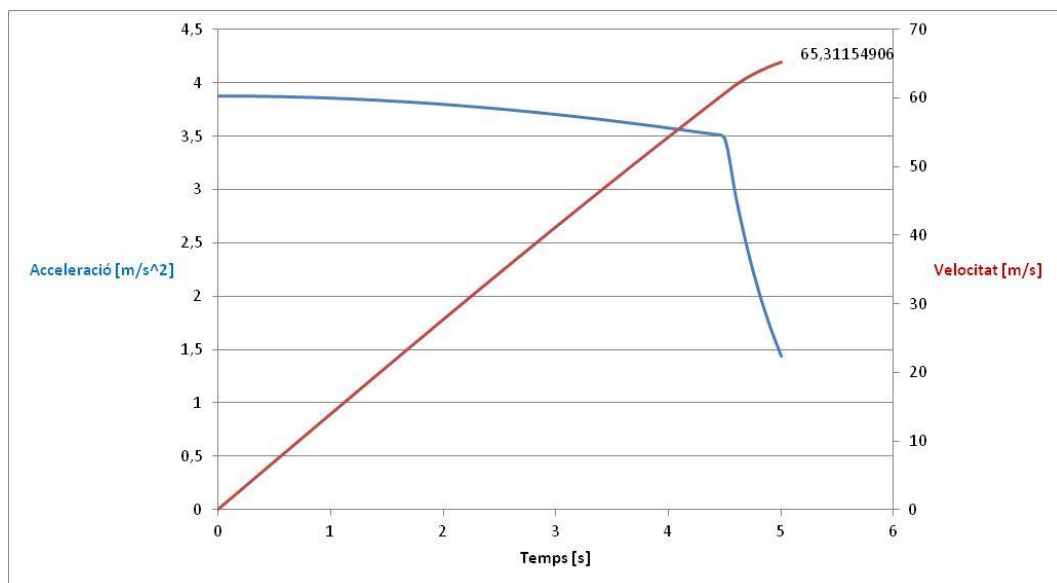
S'han realitzat moltes simulacions jugant amb el valor del comandament d'acceleració i l'angle d'inclinació. Com que no es tracta de posar-les totes perquè tampoc afegiria valor al projecte, s'han triat només les que són representatives i poden aportar dades interessants.





Il·lustració 51: corrent i velocitat vs temps. Acceleració 60%. $\alpha = 0$, $i = 4$.

En aquest cas, el comandament d'acceleració s'ha fixat a 0.6 a totes les files per a representar aquest puny del gas girat en un 60%. Com es pot veure al gràfic anterior, es trigaran 5 segons en arribar a 63 km/h amb un mateix valor d'acceleració gaire bé fins al final dels 5 segons (veure següent gràfic). A més, la intensitat serà màxima fins precisament el moment en que l'acceleració comenci a disminuir. Aquest fet, tenint les fórmules del motor DC presents, té molt de sentit. El cas és que, per un mateix valor de voltatge sol·licitat a les bateries (en aquest cas $88,8 \text{ V} \cdot 0.6 = 53.28 \text{ V}$), conforme la velocitat va creixent el terme $E = K_e \cdot \omega$ es va fent gran i la intensitat va decreixent fins que l'equació de la malla s'estabilitza. Notar que en ambdós casos, la intensitat està clarament limitada pel controlador. És per aquest motiu que la intensitat es manté al nivell màxim però roman constant fins que comença a baixar.



Il·lustració 52: acceleració i velocitat vs temps. Acceleració 60%. $\alpha = 0$, $i = 4$.



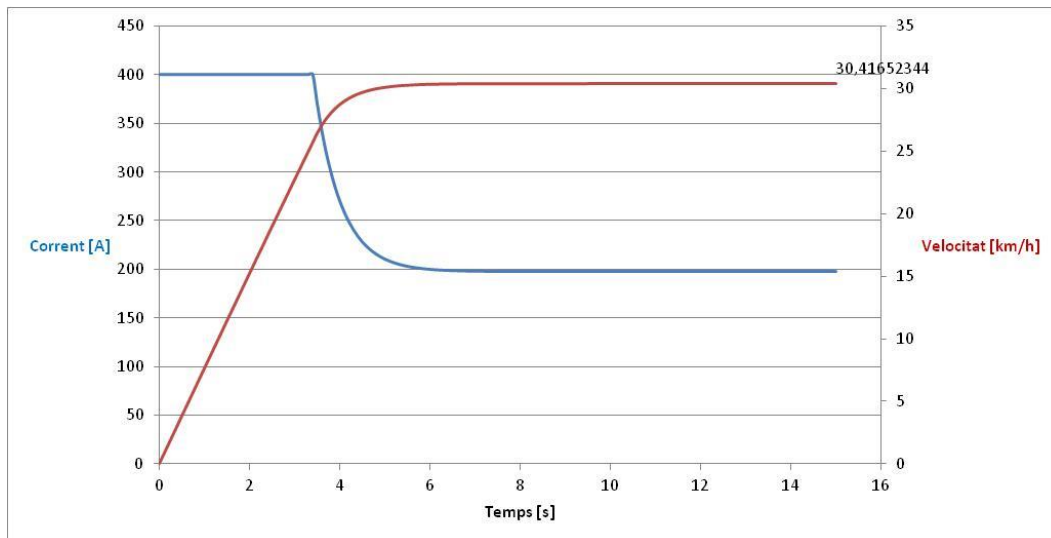
Efectivament, l'acceleració és gairebé constant fins que hi ha un clar punt d'inflexió on comença a descendir en picat cap al 0. Aquest punt és precisament el moment en que el motor està sol·licitant la intensitat que s'ha fixat com a màxima.

4.6.2.3. Pujada de rampa

Les rampes, fonamentalment de pàrquing, són els plans inclinats amb l'angle d'inclinació més pronunciat que en l'ús quotidià es pot trobar un pilot de motocicletes. És per aquesta raó, que la simulació en pujades es realitza intentant simular aquesta situació.

Les pujades amb una motocicleta elèctrica poden ser perilloses per la següent raó:

Si a la motocicleta se li exigeix molta potència en una pujada on no acaba d'agafar velocitat, a l'equació de la malla la tensió induïda E no acaba d'agafar protagonisme i per tant el corrent elèctric I és manté en valors massa alts durant tanta estona com s'estigui pujant la pujada. Per tal d'evitar deixar en mans de l'usuari la integritat del motor i de les bateries, s'haurien d'instal·lar sensors d'inclinació que, connectats al controlador, poguessin interferir al límit d'intensitat o de tensió que se li pot subministrar al motor. Efectivament, una solució per a no fer patir massa el motor en una situació de pujada llarga, és entregar-li poca diferència de potencial.



Il·lustració 53: rampa del 20% durant 15 segons. $\alpha = 0.1974$ rad (11°), $i = 4$.

I això és el que s'ha simulat en aquest cas. Amb un angle d'inclinació d'11 graus (una pujada del 20% és el límit legal per a rampes), es gira el puny accelerador un 30% o, en altres paraules, se li atorguen al motor $88.8 \text{ V} \cdot 0.3 = 26.64 \text{ V}$ i aquesta és la seva reacció.

Suposant que la motocicleta està parada al mig de la rampa i comença a accelerar des de 0 km/h (és el pitjor dels casos i el que en realitat s'està simulant), aquesta mantindrà valors d'intensitat màxims menys de 4 segons fins a assolir una velocitat de 30 km/h i una intensitat estabilitzada a 200 A, la intensitat nominal del motor.

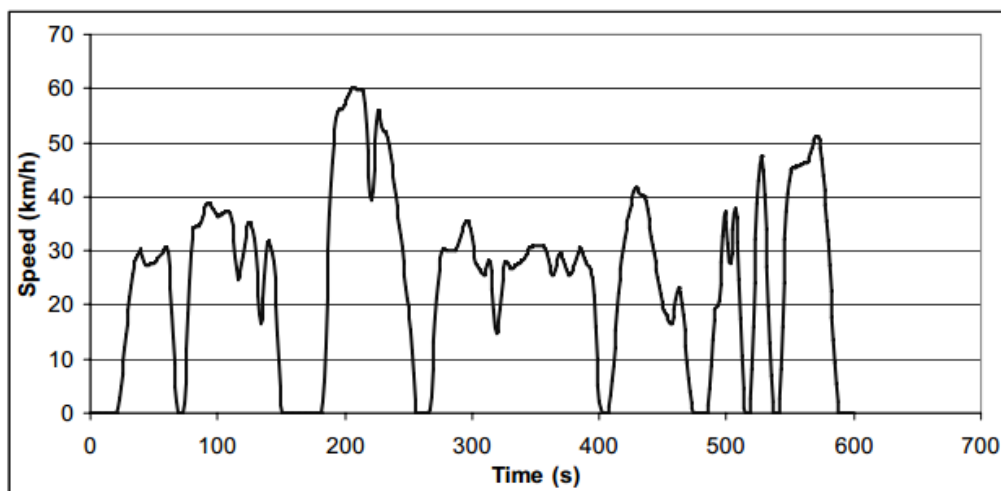


4.6.2.4. Consum de la motocicleta

Per a calcular el consum (i les emissions en el seu cas) dels vehicles, s'utilitzen uns models estandarditzats que estan dissenyats en funció del vehicle i el tipus de conducció que han de representar, els anomenats Driving Cycles.

A Europa concretament, s'utilitzen per al càlcul del consum de turismes els circuits ECE15^{xviii} per a conducció urbana, l'EUDC^{xix} per a conducció extra urbana i el NEDC^{xx} per a la conducció mixta.

Com s'ha dit, n'hi ha un munt i també n'hi ha pensats específicament per a la conducció de motocicletes que, com se sap, és diferent a la d'un automòbil especialment en trams urbans on els usuaris de motocicletes solen tenir una manera més frenètica de conduir, amb una freqüència d'acceleracions i frenades més elevada que la d'un turisme. Aquests són els WMTC^{xxi} parts I, II i III. La primera part és de conducció urbana, la segona mixta i la última per carretera.



Il·lustració 54: cicle de conducció WMDT part I

L'objectiu aquí és aconseguir representar aquests circuits amb la simulació a l'Excel jugant exclusivament amb els comandaments d'acceleració i frenada. Un cop representats, es procedeix a calcular el consum teòric de la motocicleta.

Els WMDT, però, són molt complexes de representar amb el model de simulació que s'ha fet, doncs com es pot observar a la il·lustració anterior són exageradament complexes a nivell de nombre d'acceleracions i frenades, duració i precisió d'aquestes.

Es procedeix, per tant, a realitzar la simulació amb els tests estàndards europeus, el ECE15, el EUDC i el NEDC exposats anteriorment. A continuació es presenten els tests amb les seves característiques i la representació feta a través de la simulació a l'Excel.

^{xviii} També conegut com Urban Driving Cycle (UDC) (Cicle de conducció urbà)

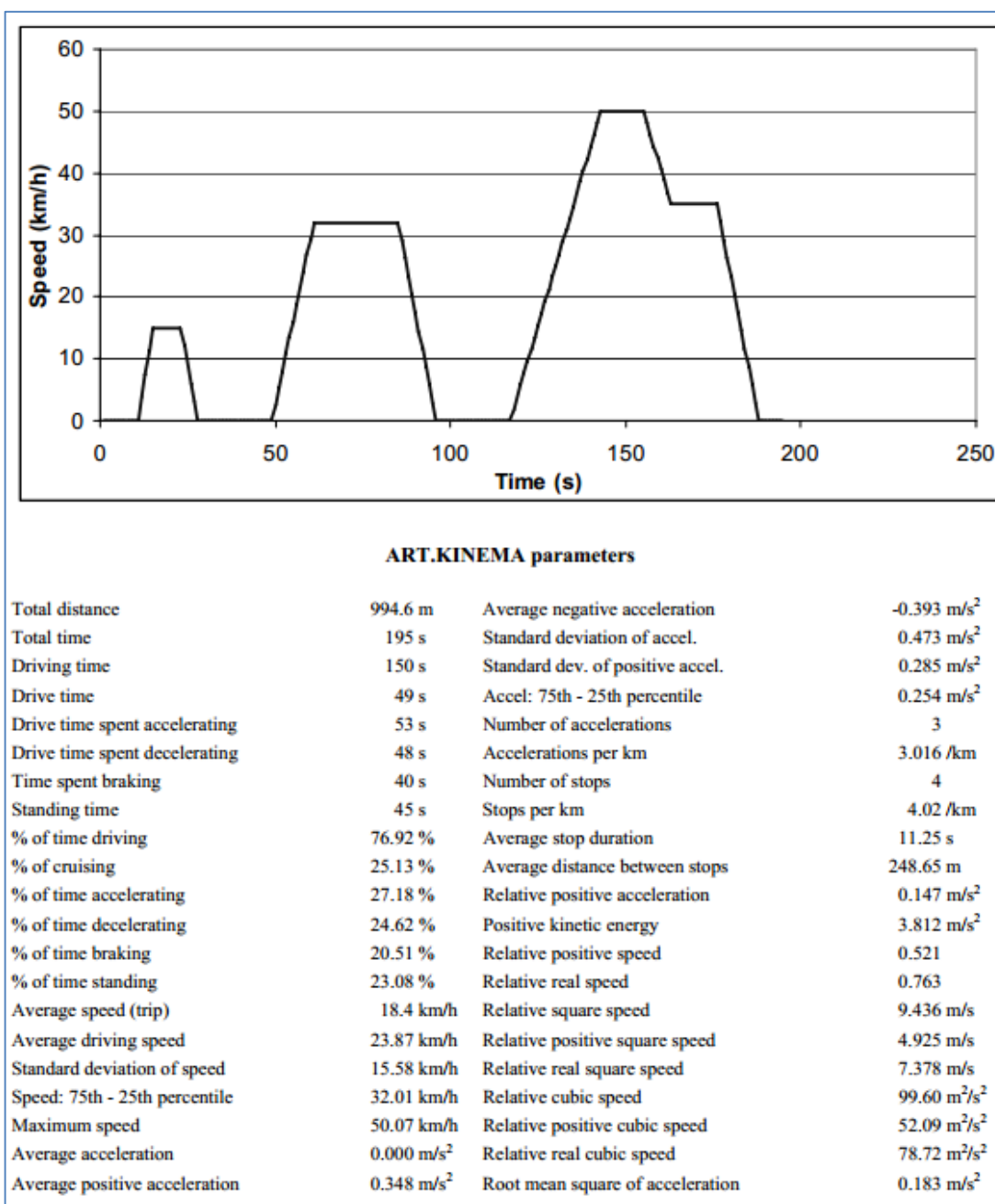
^{xix} Acrònim en anglès de Extra-Urban Driving Cycle (Cicle de conducció extra-urbà)

^{xx} Acrònim en anglès de New European Driving Cycle (Nou Cicle Europeu de conducció)

^{xxi} Acrònim en anglès de World Motorcycle Driving Test (Test Mundial de conducció de motocicletes)

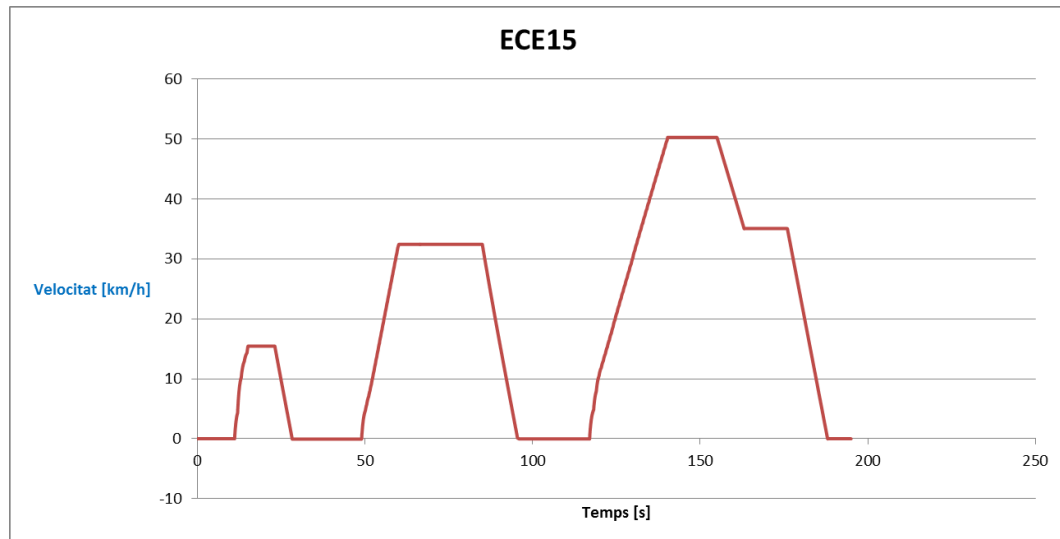


ECE15 DRIVING CYCLE



Il·lustració 55: gràfic i característiques del cicle ECE15. Font: A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions.





Il·lustració 56: representació de l'ECE15 aconseguida amb la simulació.

Així doncs, calculant les acceleracions i desacceleracions de cada tram, s'ha aconseguit representar amb força fidelitat el circuit ECE15 només jugant amb els comandaments d'acceleració i fre.

Ara només falta fer el càlcul del consum de la motocicleta al fer aquest circuit el qual es fa de la següent manera:

Recordant que l'autonomia de la motocicleta depèn de la capacitat de les bateries (50 Ah), el que s'ha de fer és calcular quanta intensitat s'ha gastat fent el circuit i veure quantes vegades es podria fer aquest circuit amb el total de capacitat. En aquest cas, es recorda que cada línia a l'Excel representa una fracció de 0.1 segons de la simulació. Com s'ha explicat, el full de càlcul inclou una columna que diu la intensitat que s'està consumint a cada fracció de 0.1 segons. El que cal fer, per tant, és calcular quants Ah es consumeixen fent l'ECE15. Es procedeix a sumar el total de la columna de la intensitat (A), a multiplicar-ho per la fracció de temps 0.1 s (As) i per últim a passar-ho a Ah. Concretament:

$$\text{Consum ECE15 [Ah]} = \sum \text{Columna Intensitat} \cdot 0,1s \cdot \frac{1h}{3600s}$$

Un cop es té aquesta xifra, es procedeix a calcular quantes vegades es podria fer aquest circuit:

$$\text{Autonomia [nº circuits]} = \frac{50 \text{ Ah}}{\text{Consum ECE15 [Ah]}}$$

Per últim, es procedeix a fer el producte de l'autonomia pel total de kilòmetres que té l'ECE15:

$$\text{Autonomia [km]} = \text{Autonomia [nº circuits]} \cdot \text{distància ECE15} \left[\frac{\text{km}}{\text{circuit}} \right]$$

Així és com han quedat els números d'aquesta operació de càlcul del consum urbà:

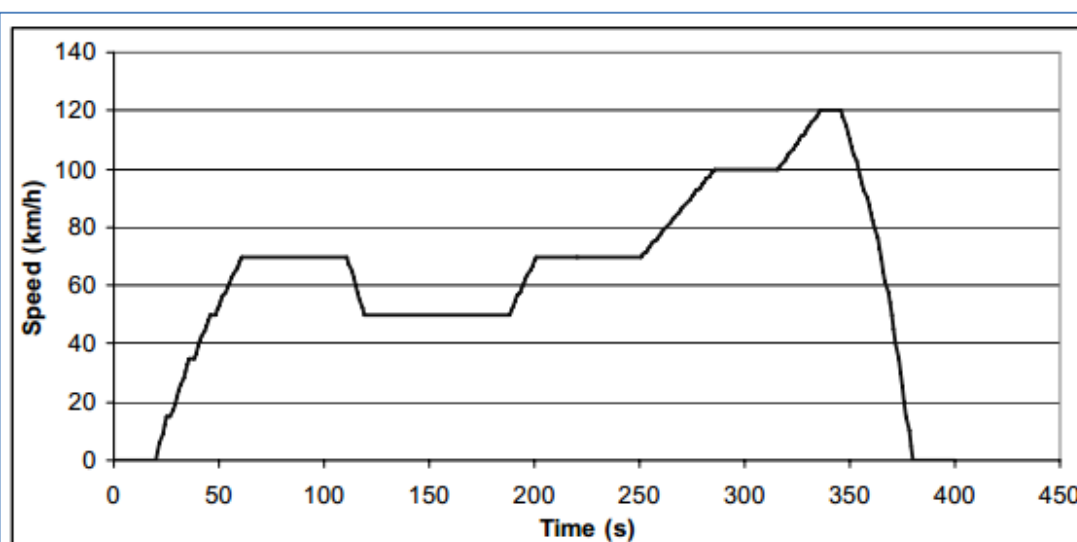
Consum ECE15 [Ah]	0.33
Capacitat bateria [Ah]	50
Distància ECE15 [km]	0.99
Autonomia [nº circuits]	153.78
Autonomia [km]	152.86



Recordant que l'autonomia urbana objectiu eren 150 km, mentre que la límit eren 110 km, es considera l'autonomia de 153 km obtinguda una dada molt correcta.

EUDC i NEDC

El NEDC, el circuit de càlcul del consum mixt, no és més que quatre cicles de conducció urbà (ECE15) sumat a un cicle de consum extra-urbà (EUDC). És per això que els dos es tracten conjuntament. De fet, a la simulació s'ha fet només un full de càlcul on s'ha representat el NEDC i des del que s'ha calculat tant el consum total com el consum particular de l'EUDC.



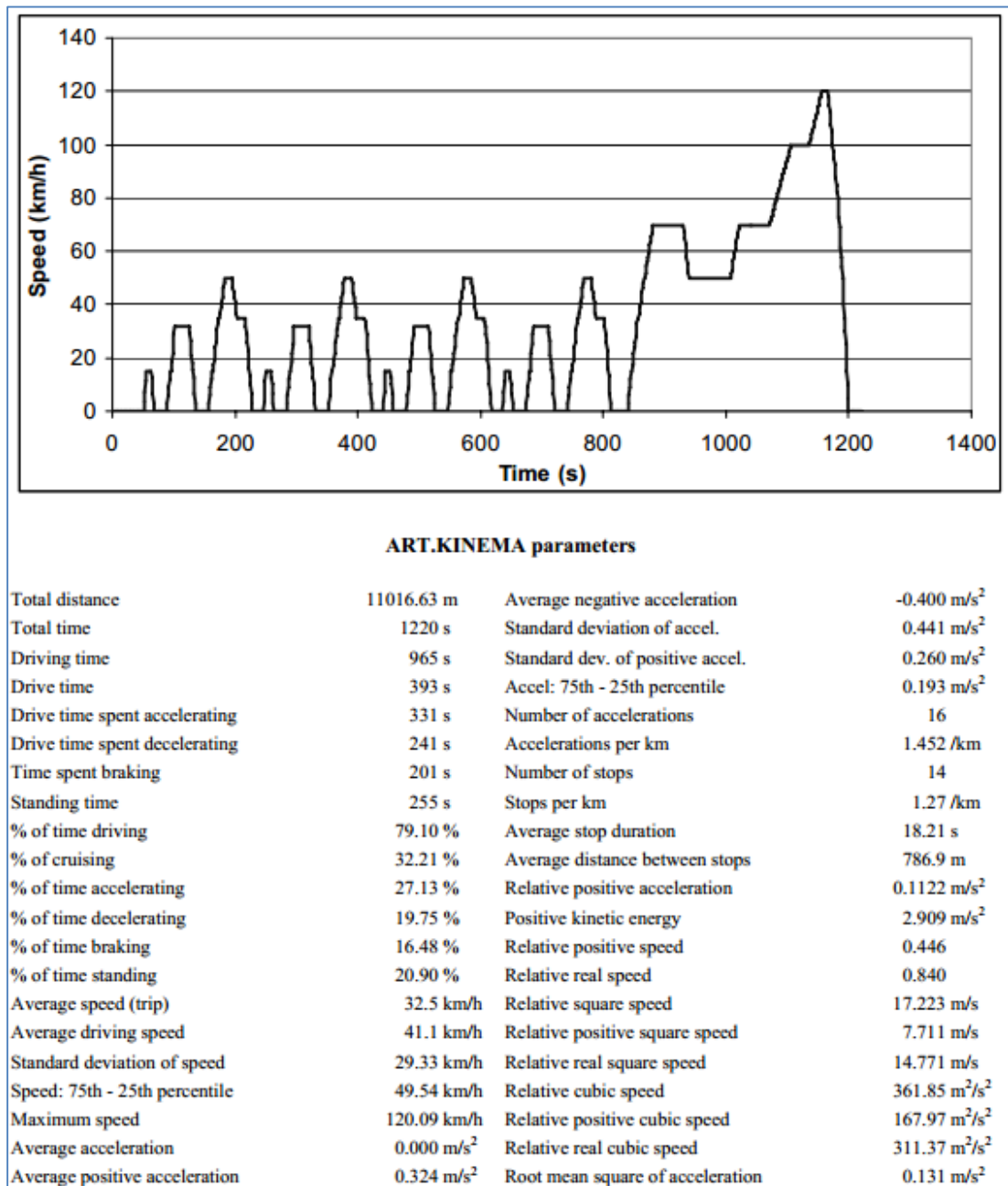
ART.KINEMA parameters

Total distance	6955.07 m	Average negative acceleration	-0.420 m/s ²
Total time	400 s	Standard deviation of accel.	0.378 m/s ²
Driving time	365 s	Standard dev. of positive accel.	0.177 m/s ²
Drive time	197 s	Accel: 75th - 25th percentile	0.221 m/s ²
Drive time spent accelerating	119 s	Number of accelerations	4
Drive time spent decelerating	49 s	Accelerations per km	0.575 /km
Time spent braking	45 s	Number of stops	2
Standing time	35 s	Stops per km	0.29 /km
% of time driving	91.25 %	Average stop duration	17.5 s
% of cruising	49.25 %	Average distance between stops	3477.54 m
% of time accelerating	29.75 %	Relative positive acceleration	0.0936 m/s ²
% of time decelerating	12.25 %	Positive kinetic energy	2.427 m/s ²
% of time braking	11.25 %	Relative positive speed	0.410
% of time standing	8.75 %	Relative real speed	0.881
Average speed (trip)	62.6 km/h	Relative square speed	21.760 m/s
Average driving speed	68.6 km/h	Relative positive square speed	9.432 m/s
Standard deviation of speed	25.88 km/h	Relative real square speed	19.047 m/s
Speed: 75th - 25th percentile	29.43 km/h	Relative cubic speed	514.92 m ² /s ²
Maximum speed	120.09 km/h	Relative positive cubic speed	237.01 m ² /s ²
Average acceleration	0.000 m/s ²	Relative real cubic speed	446.86 m ² /s ²
Average positive acceleration	0.266 m/s ²	Root mean square of acceleration	0.087 m/s ²

Il·lustració 57: gràfic i característiques del cicle EUDC (conducció extra-urbana). Font: A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions.



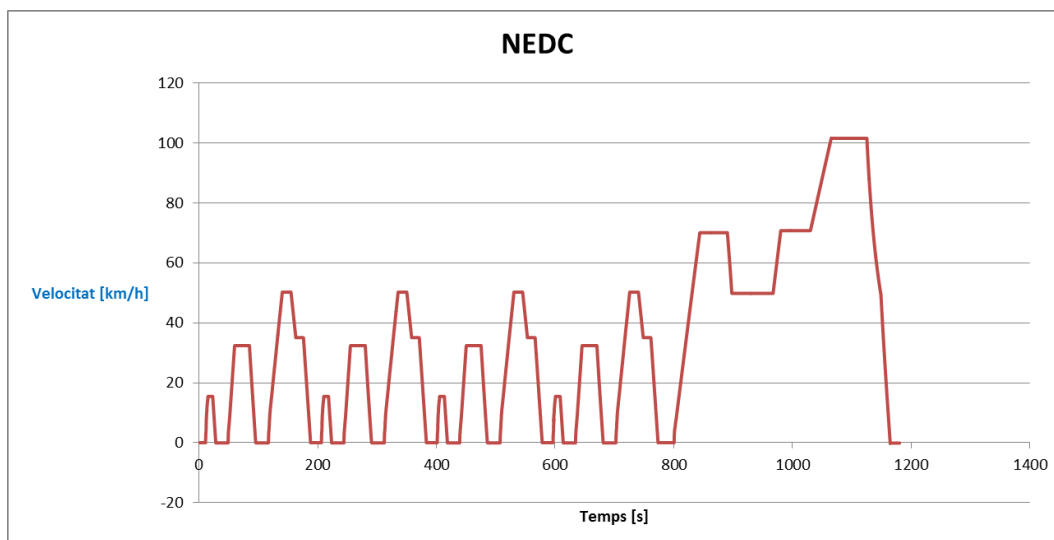
Com es pot comprovar, el cicle obligaria a la motocicleta a arribar a 120 km/h. Sabent que això no pot ser possible perquè la velocitat punta són 113 km/h, el que es farà és no realitzar la darrera acceleració i mantenir la velocitat de la motocicleta a 100 km/h fins que comenci la frenada.



Il·lustració 58: gràfic i dades del circuit NEDC (conducció mixta). Font: A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions.

A continuació es mostra la representació aconseguida amb Excel del circuit NEDC i es procedeix a fer els càlculs de consum extra-urbà i mixt.





Il·lustració 59: representació del NEDC aconseguida amb la simulació.

Com es pot veure, també s'ha aconseguit representar amb força precisió el circuit NEDC. A continuació, amb exactament la mateixa metodologia que s'ha explicat per a l'ECE15, es procedeix a calcular els consums del NEDC i el EUDC.

	NEDC (mixt)	EUDC (extra-urbà)
Consum [Ah]	4.85	4.83
Capacitat bateria [Ah]	50	50
Distància [km]	11,02	6.96
Autonomia [nº circuits]	10.31	10.36
Autonomia [km]	113.68	72.08

Així, els consums que s'obtenen són 113 km per al mixt (el límit inferior eren 110) i 72 per carretera (el límit inferior eren 70).

Cal reconèixer, en aquest cas, que aquests consums són una mica justos donat que no inclouen certes pèrdues en el sistema de tracció i per tant podrien caure per sota els límits fixats com a mínim. En cas de seguir amb el projecte i de pretendre llençar la motocicleta al mercat s'hauria d'analitzar com es pot incrementar l'autonomia de la motocicleta. Possiblement sacrificant potència (limitant la intensitat del motor a un valor una mica inferior a 400 A), o augmentant el mòdul del límit d'intensitat que les bateries reben quan s'està frenant (actualment a -115 A), així com ajustar una mica millor la relació de reducció i serien possibles opcions per on començar a ajustar el sistema elèctric de forma definitiva.



4.7. Especificacions obtingudes

Per últim, es mostra la taula inicial amb les especificacions objectiu i límit i les especificacions finalment obtingudes després del disseny del sistema elèctric de la motocicleta.

Per a calcular els valors de la potència nominal i màxima es va a la simulació de màxima acceleració fins a velocitat màxima i es consulta el valor més alt de potència elèctrica, així com el seu valor quan la motocicleta s'estabilitza (potència nominal).

	Objectiu	Límit	Obtingudes
Motor			
Potència nominal	12 kW (16.3 CV)	10 kW (13.5 CV)	12,67 kW (17.2 CV)
Potència màxima	30 kW (40.7 CV)	20 kW (27.1 CV)	35,44 kW (48 CV)
Parell màxim	65 Nm	55 Nm	67.32 Nm
Compatibilitat amb carnets	A2	A2	A2
Prestacions i consum			
Velocitat màxima	120 km/h	100 km/h	113 km/h
Acceleració de 0 a 50 km/h	4 s	6 s	3.7 s
Acceleració de 0 a 100 km/h	7 s	9 s	7.9 s
Autonomia per ciutat	150 km	110 km	152 km
Autonomia per carretera	90 km	70 km	72 km
Autonomia mitja	130 km	110 km	113 km
Sistema elèctric			
Capacitat de la bateria	50 Ah	40 Ah	50 Ah
Tensió de la bateria	88,8 V	74 V	88,8 V
Temps de càrrega	3 h	4 h	4 h



5. Normativa

Consultant la normativa aplicable a les motocicletes elèctriques s'han trobat dos principals punts vigents aplicables a aquest projecte. Un a nivell estatal referent a subvencions per a la compra de vehicles elèctrics, l'altre vigent a la Unió Europea i que per tant es pot aplicar també de cara a l'Estat Espanyol, relatiu a la homologació de vehicles elèctrics.

5.1. Normativa referent a l'homologació de vehicles elèctrics

REGLAMENT Nº 100 DE LA COMISSIÓ ECONÒMICA DE LES NACIONS UNIDES PER A EUROPA (CEPE / ONU) - DISPOSICIONS UNIFORMES RELATIVES A L'HOMOLOGACIÓ DE VEHICLES ELÈCTRICS AMB BATERIA EN RELACIÓ AMB ELS REQUISITS EN MATÈRIA DE FABRICACIÓ, SEGURETAT DE FUNCIONAMENT I EMISSIONS D'HIDROGEN (REVISIÓ 2).

Publicat a: «DOUE» núm. 45, de 14 de febrer de 2009, pàgines 17 a 47 (31 pàgs.)

Departament: Unió Europea

Referència: DOUE-L-2009-80271

Tots els apartats del text són interessants i afecten a aquest projecte, és per això que el text s'inclou a íntegre a l'annex. No obstant, es comenta la indexació dels punts més rellevants i amb més relació amb el projecte:

3. Sol·licitud d'homologació
4. Homologació
5. Especificacions i assaigs
5.1. Disposicions relatives a la fabricació del vehicle
5.1.1. Bateria de tracció
5.1.2. Protecció contra xocs elèctrics
5.2. Requisits de la seguretat del funcionament
5.2.1. Engegat
5.2.2. Condicions de funcionament i aturada
5.2.4. Reducció de l'energia en cas d'emergència
6. Modificacions i ampliació de la homologació del tipus de vehicle
7. Conformitat de la producció
8. Sancions per falta de conformitat de la producció



5.2. Normativa referent a les subvencions per a l'adquisició de vehicles elèctrics

REIAL DECRET 128/2014, DE 28 DE FEBRER, PEL QUAL ES REGULA LA CONCESSIÓ DIRECTA D'AJUDES DEL PLA D'IMPULS AL MEDI AMBIENT "PIMA AIRE 3" PER A L'ADQUISICIÓ DE VEHICLES COMERCIALS, MOTOCICLETES I CICLOMOTORS ELÈCTRICS I HÍBRIDS I BICICLETES DE PEDALEIG ASSISTIT PER MOTOR ELÈCTRIC.

Publicat a: «BOE» núm. 55, de 5 de març de 2014, pàgines 21.137-21.147 (11 pàgs.)

Secció: I. Disposicions generals

Departament: Ministeri d'Agricultura, Alimentació i Medi Ambient

Referència: BOE-A-2014-2361

TEXT:

El Pla d'Impuls al Medi Ambient «PIMA Aire», que forma part d'una estratègia més àmplia dissenyada i posada en marxa pel Ministeri d'Agricultura, Alimentació i Medi Ambient, té per objectiu reduir de forma significativa les emissions de contaminants atmosfèrics, principalment partícules, així com les emissions de CO2 mitjançant la renovació del parc actual de vehicles per models més eficients i de menor impacte ambiental disponibles al mercat espanyol.

Amb aquest propòsit, es va aprovar el Reial Decret 89/2013, de 8 de febrer, pel qual es regula la concessió directa d'ajudes al Pla d'Impuls al Medi Ambient «PIMA Aire» per a l'adquisició de vehicles comercials. [...]

El text íntegre té rellevància pel projecte i per això es publica també a l'annex. De totes formes, es comenten seguidament els punts més interessants de la normativa:

Àmbit d'aplicació: l'àmbit d'aplicació inclou la compra de motocicletes amb motor elèctric.

Beneficiaris: són les persones físiques o jurídiques que adquireixin un vehicle d'aquestes característiques (entre d'altres).

Conceptes subvencionals i condicions per a rebre la subvenció: Les motocicletes i ciclomotors elèctrics i híbrids nous (categories L1e, L2e, L3e, L4e i L5e) susceptibles d'ajuda han de tenir bateries de liti i una autonomia mínima en mode elèctric de 20 km.

Quantia dels ajuts: Motocicletes elèctriques i híbrides, categories L3e, L4e i L5e:

1r) En el cas d'acreditació de desballestament d'un altre vehicle matriculat per primera vegada amb anterioritat a l'1 de gener de 2009 (si és categoria L) o amb anterioritat a l'1 de gener de 2007 (si és categoria M o N1), es concedirà un ajut de 400 euros per vehicle, més 200 euros que aportarà el punt de venda.

2n) En el cas de no acreditació de desballestament d'un altre vehicle de categoria igual o superior, es concedirà una ajuda de 350 euros, més 150 euros que aportarà el punt de venda.



6. Estudi econòmic

Es calcula el cost econòmic del projecte realitzat comptabilitzant exclusivament el cost de les hores dedicades en la realització de les diferents activitats durant la conformació dels treballs.

Concepte	Quantitat	Cost/unitat	TOTAL
Hores de benchmark del mercat	15	30 €	450 €
Hores de documentació (teoria general)	50	30 €	1.500 €
Hores de documentació (teoria específica per component)	60	60 €	3.600 €
Hores de cerca i tria de productes	70	60 €	4.200 €
Hores de disseny (esquema de conjunt)	20	80 €	1.600 €
Hores de simulació	30	70 €	2.100 €
TOTAL			13.450 €

Com a informació extra, es proporciona també el preu de tots els components escollits durant el treball. Cal tenir en compte que per a la conformació del sistema elèctric-electrònic complet caldrien més components als que no s'ha fet referència donat l'abast del projecte i que, per tant, el cost del mateix seria més elevat que el que a continuació es mostra.

Concepte	Quantitat	Cost/unitat	TOTAL
Motor (LMC LEM-200 D127)	1	1.548 €	1.548 €
Bateries (GS YUASA LEV50)	24	125 €	3.000 €
BMS (-)	24	0,63 €	15 €
Controlador (Kelly Controls KDH12601E)	1	703 €	703 €
Convertidor (Kelly HWZ Series DC/DC Converter 96 V to 12 V)	1	113 €	113 €
Puny accelerador (Magura Twist Grip Throttle)	1	52 €	52 €
Contactador General (Albright SW200)	1	80 €	80 €
Carregador (AA Portable Power Corp)	1	440 €	440 €
TOTAL			5.951 €



7. Impacte ambiental

L'impacte ambiental del projecte és majoritàriament el relacionat amb la fabricació del propi producte i de tots els components que s'adquireixen per a la seva existència.

A banda d'aquest, serà també l'impacte generat pels processos d'obtenció de l'energia elèctrica que un prototip de la motocicleta gastaria, així com els residus que deixaria el prototip un cop inutilitzat.

Es procedeix doncs, a calcular l'equivalent d'emissions de CO₂ que s'emetrien cada 100 km recorrent el circuit NEDC (mixt). Es determinaran els kWh consumits pel circuit NEDC, es procedirà a calcular els kWh consumits per cada 100 km i, finalment, s'aplicaran els factors de conversió^{xxii} adients per a determinar els kg de substàncies contaminants emesos cada 100 km.

- Diòxid de carboni (CO₂): 0.114 kg/kWh
- Diòxid de sofre (SO₂): 0.244 g/kWh
- Òxids de nitrogen (NO_x): 0.173 g/kWh

Càlcul d'emissions:

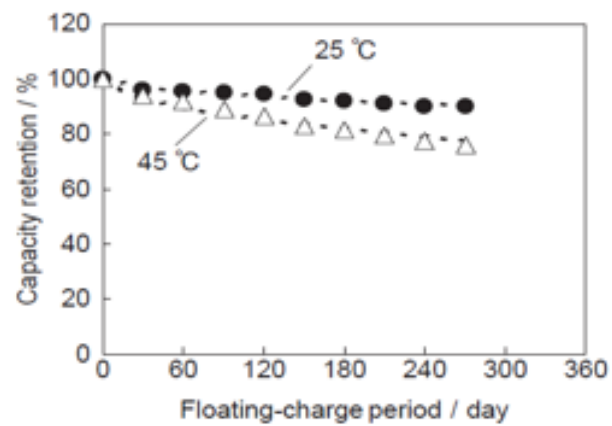
Consum NEDC [kWh]	0.36
Distància NEDC [km]	11.02
Consum [kWh / 100 km]	3.28
Emissió [kg CO ₂ / 100 km]	0.37
Emissió [kg SO ₂ / 100 km]	0.80
Emissió [kg NO _x / 100 km]	0.57

Les emissions equivalents de la motocicleta són, per tant, baixes especialment si es comparen amb les de vehicles de combustió de característiques similars, que ronden els 60 g per cada 100 km. Tot i que les d'un prototip del model rondarien l'ordre de les aquí calculades, cal dir que la simulació que s'ha realitzat, com s'ha dit, no considera certes pèrdues (cablejat, controlador...) i que a més, tant per l'estil de conducció que es representa (amb acceleracions i frenades poc brusques) com per la quantitat d'energia que es recupera gràcies al fre regeneratiu simulat (que possiblement no seria tant efectiu a un prototip), les dades són possiblement més optimistes que la realitat.

Finalment, per tal de minimitzar la petjada ecològica que deixaria el prototip un cop inutilitzat, es tractaria bàsicament de reciclar tots els materials que fossin possibles i, sobre tot, tractar les bateries de liti degudament cada vegada que s'hagin de canviar (tot hi que com mostra el següent gràfic s'estima que conservarien el 65% de capacitat al cap de 10 anys d'ús).

^{xxii} Dades proporcionades per la World Wide Fund for Nature (WWF) relatives a la mitja d'emissions generades pels diferents mètodes d'obtenció d'energia elèctrica a Espanya l'any 2014.





Il·lustració 60: evolució de la capacitat de les bateries LEV50, testades a 25°C i 45°C durant 270 dies. Font: <http://atip.org>



8. Planificació

A continuació es presenta la planificació de les tasques que s'han realitzat en el projecte, representat per un diagrama de Gantt amb la setmana com a unitat de temps.

Tasca	Duració	Octubre '14			Novembre '14			Desembre '14			Gener '15			Febrer '15			Març '15			Abril '15			Maig '15									
State of the art	7 setm	29	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25
Context	4 setm																															
Estudi de mercat	5 setm																															
Documentació	9 setm																															
Conceptes tècnics	4 setm																															
Benchmark mercat	5 setm																															
Disseny especificacions	1 setm																															
Disseny conceptual (aprenentatge i tria)	11 setm																															
Motor	2 setm																															
Bateries i BMS	2 setm																															
Controlador i fre regeneratiu	2 setm																															
Controls	1 setm																															
Convertidor	1 setm																															
Carregador, contactor i cablejat	1 setm																															
Esquema de conjunt	2 setm																															
Simulació	8 setm																															
Disseny model simulació	4 setm																															
Calibratge model	2 setm																															
Proves	2 setm																															
Normativa	2 setm																															
Estudi econòmic	1 setm																															
Impacte ambiental	1setm																															
Redacció del projecte	6 setm																															
Presentació del projecte	-																															



9. Consideracions i conclusions

Si se'm permet, prescindiré dels temps impersonals per a redactar les conclusions.

Quan vaig arribar a la universitat tenia el somni d'algun dia arribar a ser enginyer a la Fórmula 1. Avui, la meua perspectiva i les meves preferències han canviat, però havent fet un Grau en Enginyeria, volia realitzar un Treball Final de Grau d'enginyeria i, a poder ser, d'alguna cosa relacionada amb automoció.

La realització d'aquest projecte m'ha permès posar-me a la pell o, si més no, entendre la manera de treballar que ha de tenir un Enginyer a l'hora de realitzar una feina d'aquestes característiques. L'excel·lència amb la que s'han d'entendre tots els conceptes teòrics relacionats amb el funcionament de la motocicleta, la precisió amb la que s'han d'escollir tots i cadascun dels components del sistema (no només els que he triat donat l'abast d'aquest treball), són només dos exemples de les moltes realitats que he pogut apreciar durant la realització del projecte i la interacció amb el tutor de projecte.

Ha costat certament un esforç intel·lectual important en moltes ocasions, i ha sigut també un exercici d'organització i serietat molt notable que m'han servit per donar-me compte d'aquesta realitat i també per a millorar com a enginyer i entendre millor el sector de les motocicletes en general, i dels vehicles elèctrics en particular.

Abans de començar el projecte, el tutor Emilio Angulo a qui aprofito per agrair tot el que he après aquests mesos, ens va preguntar al Borja i a mi quants enginyers crèiem que eren necessaris per elaborar un model totalment nou d'una impressora HP Deskjet típica per a casa. Vam respondre entre 5 i 10. Avui em dono compte que com a mínim se'n necessitarien 50, igual que per a desenvolupar una motocicleta elèctrica partint de les arrels més elementals. O això, o molt de temps, dedicació i domini del camp.

La realització d'aquest projecte ha sigut tot un plaer potser massa entrebancat degut a altres obligacions. M'hagués agradat poder dedicar-hi més temps per a desenvolupar-lo de forma més profunda i, qui sap, potser arribar a fer un prototip.

Finalment, agrair novament la fructuosa tutorització a Emilio Angulo i desitjar que el projecte sigui útil a qui, per qualsevol motiu, li pugui interessar llegir-lo.



10. Bibliografia i webgrafia

Aprenentatge general

- Motocicletas, Arias Paz

Estudis de mercat i anàlisi competència

- European Association of Motorcycle Manufacturers (<http://www.acem.eu>)
- <http://www.electromaps.com/motos-electricas>

El motor de corrent contínua:

- Apunts de Màquines Elèctriques (2013-2014 Q1)
- <http://www.electronics-tutorials.ws/blog/pulse-width-modulation.html>

Bateria, BMS

- <http://batteryuniversity.com>
- http://liionbms.com/php/wp_passive_active_balancing.php

Informació cel·les LEV50

- <http://atip.org/atip-publications/atip-news/2009/7804-gs-yuasas-commercial-lithium-ion-battery-for-ev.html>
- <http://wenku.baidu.com/view/a346152558fb770bf78a550c.html>

Controlador, pont en H, PWM

- Apunts d'electrònica (2013-2014 Q2)
- <http://www.electronics-tutorials.ws/blog/pulse-width-modulation.html>

Cicles de càlcul de consum

- A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, T J Barlow, S Latham, I S McCrae and P G Boulter

Dades ambientals

- World Wide Fund for Nature (WWF) (<http://wwf.org/>; <http://www.wwf.es>)

